
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит шесть раз в год

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники

Редакционная коллегия

Л. М. Лыньков (зам. главного редактора),
В. Р. Стемпицкий (зам. главного редактора),
О. В. Бойправ (ответственный секретарь редколлегии),
М. П. Багура, В. Е. Борисенко, М. Г. Гасанов, С. В. Козлов,
В. А. Лабунов, Ю. В. Писецкий, А. С. Сигов,
А. Г. Смирнов, М. М. Татур, В. Ю. Цветков

Редакционный совет

И. И. Абрамов, В. Е. Агабеков, И. С. Азаров, А. И. Белоус, Н. В. Гапоненко,
С. В. Гапоненко, В. В. Голенков, В. Ф. Голиков, А. Л. Гурский, А. П. Достанко,
В. А. Емельянов, А. А. Иванюк, Ф. Ф. Комаров, В. К. Конопелько, А. П. Кузнецов,
А. А. Кураев, В. И. Курмашев, В. Л. Ланин, Н. И. Листопад, В. Е. Магюшков,
Ф. И. Пантелеенко, В. А. Пилипенко, С. Л. Прищепа, Н. К. Толочко,
А. А. Хмыль, В. В. Цегельник, Г. П. Яблонский, В. Н. Ярмолик

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Богуш В. А., Гусинский А. В., Карпович В. А., Певнева Н. А., Родионова В. Н., Касперович М. М., Кашко И. А., Грапов Д. В., Кукуть Ю. М., Лабунов В. А. Перспективные интеллектуальные материалы для радиоэлектроники.....	5
Лобанок М. В., Гайдук П. И. Температурная зависимость роста 3C-SiC при быстрой вакуумно-термической обработке кремния.....	12
Зеленин В. А., Нарушко Е. О., Гладинов А. Д. Получение многокомпонентных покрытий стабильного состава для экранов электромагнитного излучения.....	19
Пилипенко В. А., Омельченко А. А. Механизм формирования фиксированного заряда в слое SiO ₂ , полученном термическим окислением кремния.....	28

Леонович Н. В., Товт П. Д., Котов Д. А. Формирование алмазоподобных углеродных покрытий методом химического осаждения в плазме высокой плотности.....	33
Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. Estimating the Parameters of Laser Processing of Diamonds Using the Finite Element Method and Artificial Neural Networks (Емельянов В. А., Шершнев Е. Б., Никитюк Ю. В., Соколов С. И., Аушев И. Ю. Определение параметров лазерной обработки алмазов с применением метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей).....	40
Галкин Я. Д., Дворников О. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н. Схемотехническая модернизация операционных усилителей для увеличения скорости нарастания выходного напряжения	46
Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Беликов А. Н., Рыбаков Д. Г. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения	54
Кийко В. Н., Наумович Н. М., Давыдов М. В., Журавлёв В. И. Использование тросовых виброизоляторов для виброзащиты кварцевых генераторов.....	63
Мищенко В. Н. Моделирование из первых принципов свойств графена, модифицированного атомами фтора	71
Герман О. В., Герман Ю. О., Мигалевич С. А., Кузнецов М. В. Принятие решений на основе условной нечеткой меры.....	76
Чебаков С. В., Серебряная Л. В. Метод достижения цели на графовой модели при двух критериях качества	84
Врублевский С. С., Машкин Е. В., Бысов А. А. Математическая модель VPN в сети электро-связи специального назначения.....	93
Пилецкий И. И., Батура М. П., Волорова Н. А. Методология построения прототипа системы комплексного анализа данных тематических сайтов	101
Лихачёв Д. С., Вашкевич М. И., Петровский Н. А., Азаров И. С. Комбинированный метод отбора информативных признаков для выявления речевых патологий по голосу	110
Чураков А. В., Камлач П. В., Онгарбаева А. И. Моделирование магнитотаргетинга лекарственных средств, основанное на вычислении проницаемости электромагнитного поля в ткани организма человека	118

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 17.08.2023. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 12,3. Тираж 75 экз. Заказ 199.

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 329а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Индекс для индивидуальной подписки 00787. Индекс для ведомственной подписки 007872

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2023

DOKLADY BGUIR

Published 6 times a year

The journal is being published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No 1087

The journal is included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index

Chief Editor

Vadim Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Bogush V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Pevneva N. A., Rodionova V. N., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Grapov D. V., Kukut Yu. M., Labunov V. A. Promising Smart Materials for Radioelectronics.....	5
Labanok M. V., Gaiduk P. I. Temperature Dependence of 3C-SiC Growth During Rapid Vacuum Thermal Silicon Treatment	12
Zelenin V. A., Narushko E. O., Gladinov A. D. Obtaining Multicomponent Coatings of a Stable Composition for Electromagnetic Radiation Screens	19
Pilipenka U. A., Amelchanka H. A. Model of the Formation of a Fixed Charge in SiO ₂ , Produced by Thermal Oxidation of Silicon	28
Leonovich N. V., Tovt P. D., Kotov D. A. Formation of Diamond-Like Carbon Coatings by Chemical Deposition in High Density Plasma	33
Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. Estimating the Parameters of Laser Processing of Diamonds Using the Finite Element Method and Artificial Neural Networks	40
Galkin Ya. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N. Circuit Design Modernization of Operational Amplifiers for Increasing Slew Rate of Output Voltage.....	46
Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers	54

Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravlev V. I. Use of Cable Vibration Isolators for Vibration Protection of Quartz Generators.....	63
Mishchanka V. N. First-Principles Modelling of the Properties of Graphene Modified with Fluorine Atoms.....	71
German O. V., German Ju. O., Migalevich S. A., Kuznetsov M. V. Decision-Making Based on a Conditional Fuzzy Measure	76
Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. Method of Achieving the Goal on a Graph Model with Two Quality Criteria	84
Vrublevsky S. S., Mashkin E. V., Bysov A. A. Mathematical Model of VPN in a Special Purpose Telecommunication Network.....	93
Piletski I. I., Batura M. P., Volarava N. A. Methodology for Building a Prototype System for Complex Data Analysis of Thematic Sites.....	101
Likhachov D. S., Vashkevich M. V., Petrovsky N. A., Azarov E. S. Combined Method for Informative Feature Selection for Speech Pathology Detection.....	110
Churakov A. V., Kamlach P. V., Ongarbayeva A. I. Simulation of Magnetotargeting of Medicines Based on the Calculation of Permeability of Human Tissues by the Electromagnetic Field ...	118

Responsible Secretary T. Mironenka

Signed for printing 17.08.2023. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. 1. 14,65. Ed.-ed. 1. 12,3. Edition 75 copies. Order 199.

Editorial Adress: P. Brovki St., 6, Off. 329a, Minsk, 220013, Republic of Belarus
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
Tel.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.
220013, Minsk, P. Brovki St., 6

Founder – Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”
Index for individual subscription 00787. Index for departmental subscription 007872



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-5-11>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.335.3

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

В. А. БОГУШ, А. В. ГУСИНСКИЙ, В. А. КАРПОВИЧ, Н. А. ПЕВНЕВА,
В. Н. РОДИОНОВА, М. М. КАСПЕРОВИЧ, И. А. КАШКО, Д. В. ГРАПОВ,
Ю. М. КУКУТЬ, В. А. ЛАБУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 14.03.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Выполнены исследования многослойного материала – полимерной радиопрозрачной электропроводящей пленки полианилина концентрации 5, 10 и 50 % по массе на радиопрозрачной подложке из стеклопластика. Такие материалы являются многофункциональными – собственно материал с требуемыми характеристиками, но при воздействии внешнего электромагнитного излучения выполняет экранирующие функции. Образцы электропроводящего полимера (пленки полианилина), нанесенные на подложку из стеклопластика, обладают малым затуханием в полосе прозрачности 8–12 ГГц, низким коэффициентом отражения электромагнитного излучения, высокими проводимостью и эксплуатационными характеристиками, технологичностью.

Ключевые слова: электромагнитные волны, поглощение, отражение, «умный» материал, проводящий полимер.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Перспективные интеллектуальные материалы для радиоэлектроники / В. А. Богуш [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-5-11>.

PROMISING SMART MATERIALS FOR RADIOELECTRONICS

VADIM A. BOGUSH, ALEXANDER V. GUSINSKY, VIKTAR A. KARPOVICH,
NATALIA A. PEVNEVA, VALENTINA N. RODIONOVA, MARINA M. KASPEROVICH,
IVAN A. KASHKO, DMITRY V. GRAPOV, YURIY M. KUKUT, VLADIMIR A. LABUNOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14.03.2023

Abstract. The investigations of a multilayer material – a polymeric radio-transparent electrically conductive film of polyaniline with a concentration of 5, 10 and 50 % by weight on a radio-transparent fiberglass substrate were carried out. Such materials are multifunctional – the material itself has the required characteristics, but when it is exposed to external electromagnetic radiation, it provides shielding functions. Electrically conductive polymer samples (polyaniline film) deposited on a fiberglass substrate have low attenuation in the 8–12 GHz transparency band, low electromagnetic radiation reflection coefficient, high conductivity and performance characteristics, as well as manufacturability.

Keywords: electromagnetic waves, absorption, reflection, “smart” material, conductive polymer.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Bogush V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Pevneva N. A., Rodionova V. N., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Grapov D. V., Kukut Yu. M., Labunov V. A. (2023) Promising Smart Materials for Radioelectronics. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-5-11> (in Russian).

Введение

Одним из важнейших современных направлений развития материаловедения являются разработка и создание материалов 3-го поколения – интеллектуальных материалов (англ. – smart materials). К ним относятся такие, которые способны активно противодействовать внешним факторам (нагрузкам, излучению и т. д.) и адаптироваться к ним после оценки характера внешнего воздействия и собственного состояния; радиопоглощающие материалы, реагирующие на внешние электромагнитные воздействия, и т. д. Отличительные черты «умных» материалов – дополнительные функциональные возможности, которые выходят за пределы свойств, определяемых их структурой. Они выполняют двойную или даже тройную функцию – собственно материала с требуемыми характеристиками, датчика на внешнее воздействие и в некоторых случаях устройства, «запрограммированного» на определенное поведение. Это достигается благодаря структуре и составу таких материалов. К таким относятся и электропроводящие полимеры [1].

Электропроводящие полимерные материалы способны экранировать высокочастотное электромагнитное излучение от внешних источников. Существуют проводящие полимеры (полимеры с собственной проводимостью), которые возвращаются к исходному состоянию после воздействия света, электричества, магнитного поля [2]. Отличительная особенность этих материалов состоит в том, что они эффективно экранируют не только высокочастотное электромагнитное, но и радиационное излучение.

Существование электропроводности в полимерах объясняется тем, что в местах дефектов их структуры возникает неспаренный электрон, который может передвигаться вдоль полимерной цепи. Легирование проводящего полимера акцепторами или донорами электронов приводит к увеличению его электропроводности за счет уменьшения энергии, требующейся для образования подвижного электрона. Наиболее известными и широко применяемыми проводящими полимерами являются полианилин и полипиррол [3]. Минимальное удельное сопротивление наблюдается в чистых ориентированных полимерах с большой молекулярной массой. Наибольшие полученные значения составляют ~ 10 Ом·м для полиацетилена и 2–10 Ом·м для полианилина [1].

Полианилин является распространенным электропроводящим полимером благодаря простоте получения и разнообразию свойств, достижимых за счет допирования. Получение полианилина основано на полимеризации анилина, которая осуществляется электрохимически, методом окислительной полимеризации либо другими способами [4–6].

Цель исследований – изучение комплекса свойств макетных образцов полимерной радиопрозрачной электропроводящей пленки полианилина различной концентрации, нанесенной на радиопрозрачную подложку, для технологий создания материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением.

Методика проведения расчетов и эксперимента

В процессе исследований разработаны два метода формирования слоев проводящего полимера полианилина (PANI) – из его суспензии и порошка. В качестве растворителя использовался *n*-метилпирролидон (NMP). Слои полианилина были сформированы на подложках стеклопластика размерами 100×60×3 мм. Для улучшения адгезии поверхность подложек смачивалась водой и обрабатывалась наждачной бумагой с зернистостью P150 до достижения матирования. После матирования подложки вытирали бумажными салфетками и сушили на воздухе не менее 20 мин.

Для получения суспензии использовали 0,4 г полианилина в виде гранул, которые измельчали в ступке при помощи пестика. Полученный порошок полианилина помещали в стаканчик для взвешивания и добавляли 5 мл *n*-метилпирролидона. Суспензирование полученной смеси осуществлялось с помощью ультразвука на протяжении 30 мин. По завершении суспензирования на стенках стаканчика наблюдались крупные частицы полианилина размерами 100–300 мкм (рис. 1, а). Для улучшения гомогенности в суспензию добавляли еще 5 мл *n*-метилпирролидона и проводили повторное суспензирование ультразвуком в течение 20 мин. По завершении процесса частиц на стенках стаканчика больше не наблюдалось (рис. 1, б), а крупные частицы полианилина выпали в осадок на дно стаканчика (рис. 1, в).

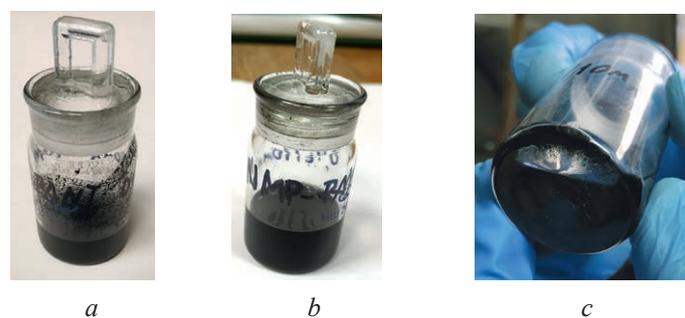


Рис. 1. Суспензия полианилина: *a, b* – в 5 и 10 мл *n*-метилпирролидона соответственно; *c* – ее осадок в 10 мл *n*-метилпирролидона
Fig. 1. Suspension of polyaniline: *a, b* – in 5 and in 10 ml *n*-methylpyrrolidone respectively; *c* – its pellet in 10 ml *n*-methylpyrrolidone

При формировании слоя полианилина из суспензии подложки размещали на строго горизонтальной поверхности для обеспечения равномерности слоя. На поверхность подложек суспензию полианилина наносили капельно, затем при помощи стеклянной палочки капли распределяли по площади подложки. Объем нанесенной суспензии составил 1 и 2 мл, что в пересчете на площадь подложки соответствует 1,65 и 3,30 мл/дм². Суспензия удерживалась на поверхности образца силами поверхностного натяжения (они не удерживают более 2 мл вещества). Сушка осуществлялась на воздухе на протяжении 16 ч при нормальных условиях. Исследование поверхности образцов методом оптической микроскопии при увеличении $\times 65$ не позволило рассмотреть и определить размер частиц, составляющих пленку. Из этого можно сделать вывод, что их размер менее 10 мкм. Сопротивление слоев превышало 10 МОм/квадрат. При полном растворении полианилина в суспензии толщины слоев составили 5 и 10 мкм. Толщина слоя определялась исходя из известной площади подложки, прироста веса и плотности полианилина, равной 1,33 г/см³. Достоинства метода формирования слоев полианилина из суспензии – равномерность и хорошая адгезия слоя (слой не осыпается). Недостатки – большой расход растворителя и необходимость формировать более толстые слои за несколько итераций. Метод можно использовать для создания пленок толщиной до 10–20 мкм, но при этом каждая итерация нанесения слоя будет занимать сутки.

Для формирования на подложке слоя полианилина толщиной 50 мкм из порошка было использовано 0,4 г полианилина. Гранулы полианилина механически измельчали в ступке пестиком до состояния порошка. Порошок переносили на подложку (рис. 2, *a*), после чего смачивали *n*-метилпирролидоном и полученную пасту распределяли по поверхности подложки при помощи шпателя (рис. 2, *b*). Сушка NMP происходила в среде воздуха в вытяжном шкафу в течение 16 ч при нормальных условиях. Высушенный образец исследовали визуально, после чего измеряли удельное сопротивление нанесенного слоя (рис. 3).

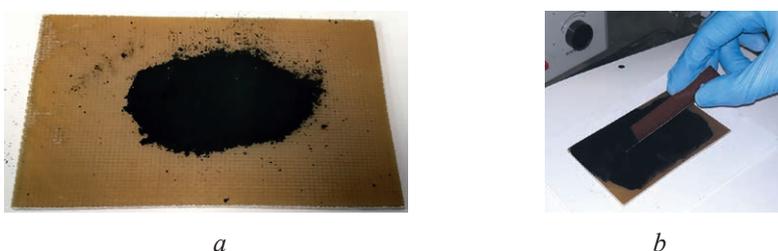
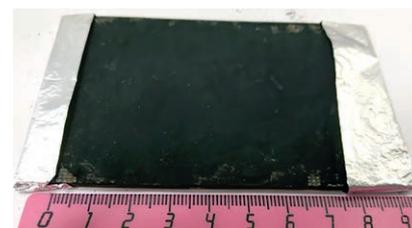


Рис. 2. Формирование слоя полианилина толщиной 50 мкм: *a* – порошок полианилина на подложке; *b* – распределение пасты полианилин + *n*-метилпирролидон на подложке
Fig. 2. Formation of a layer of polyaniline with a thickness of 50 μm :
a – polyaniline powder on a substrate; *b* – distribution of polyaniline + *n*-methylpyrrolidone on a substrate

Рис. 3. Образец полианилина толщиной 50 мкм, подготовленный для измерения удельного сопротивления
Fig. 3. Sample with a 50 μm polyaniline prepared for resistivity measurements



Сопrotивление слоя измеряли посредством накладных контактов из алюминиевой фольги, размещенных по краям образца. Образец помещали слоем полианилина вниз, чтобы улучшить прижим алюминиевых электродов к слою. Сопrotивление образца в данной конфигурации составило 150–1500 кОм. При повторном изготовлении образца толщиной 50 мкм гранулы полианилина массой 0,421 г измельчали с помощью валика. На поверхности образца образовывался слой из суспензии полианилина и твердого остатка, состоящего из твердых частиц полианилина. Образец сушили в течение 16 ч в среде воздуха при нормальных условиях. После высыхания сопrotивление образца составило 300 кОм при наличии механического прижима. После сушки в вакууме сопrotивление образца увеличилось до (8000 ± 4000) кОм. Улучшение механических свойств пленок, сформированных из порошка полианилина, возможно за счет применения связующих веществ, таких как эпоксидные смолы и силикон. Измерение коэффициента ослабления и коэффициента отражения электромагнитного излучения макетных образцов композиционных структур P5, P10, P50 в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц выполняли волноводным методом с использованием векторного анализатора цепей Anritsu MS4644B и двух коаксиально-волноводных переходов КВП-23x10 (рис. 4). Макетные образцы представляли собой стеклопластик с нанесенным слоем полианилина концентрацией по массе: P5 – 5 %, P10 – 10 %, P50 – 50 %.

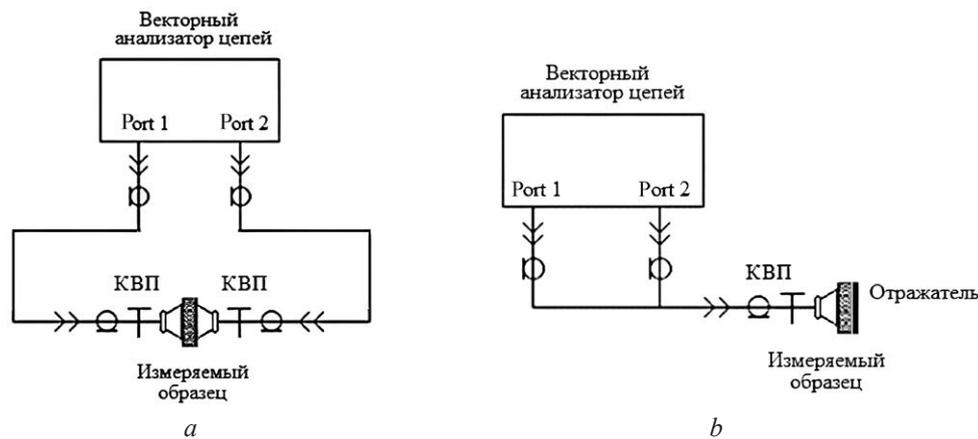


Рис. 4. Схема для измерений коэффициентов ослабления (а)

и отражения электромагнитного излучения (б) макетных образцов композиционных структур P5, P10, P50

Fig. 4. Scheme for measurements of coefficients (a) and reflection of electromagnetic radiation (b) of prototype samples of composite structures P5, P10, P50

Результаты исследований и их обсуждение

Выполнены исследования макетных образцов композиционных структур, содержащих полимерную радиопрозрачную электропроводящую пленку полианилина, по измерению радиопоглощающих и радиоотражающих свойств в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Результаты измерения коэффициента ослабления (радиопрозрачность) образца стеклопластика (подложки) размерами $500 \times 500 \times 2$ мм в диапазоне частот 1–12 ГГц приведены на рис. 5.

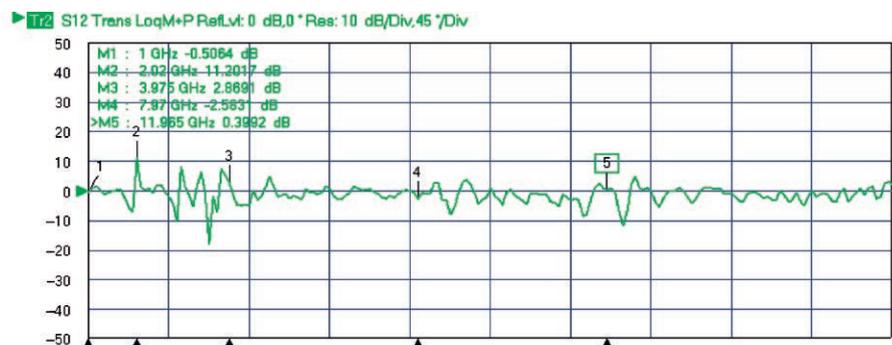


Рис. 5. Диаграмма поглощения экспериментального образца стеклопластика (подложка) в диапазоне частот 1–12 ГГц

Fig. 5. The absorption diagram of the experimental fiberglass sample (substrate) in the frequency range 1–12 GHz

Результаты измерения коэффициента ослабления и коэффициента отражения макетных образцов композиционных структур P5, P10 и P50 (стеклопластик со слоем полианилина) в диапазоне частот 8–12 ГГц представлены на рис. 6.

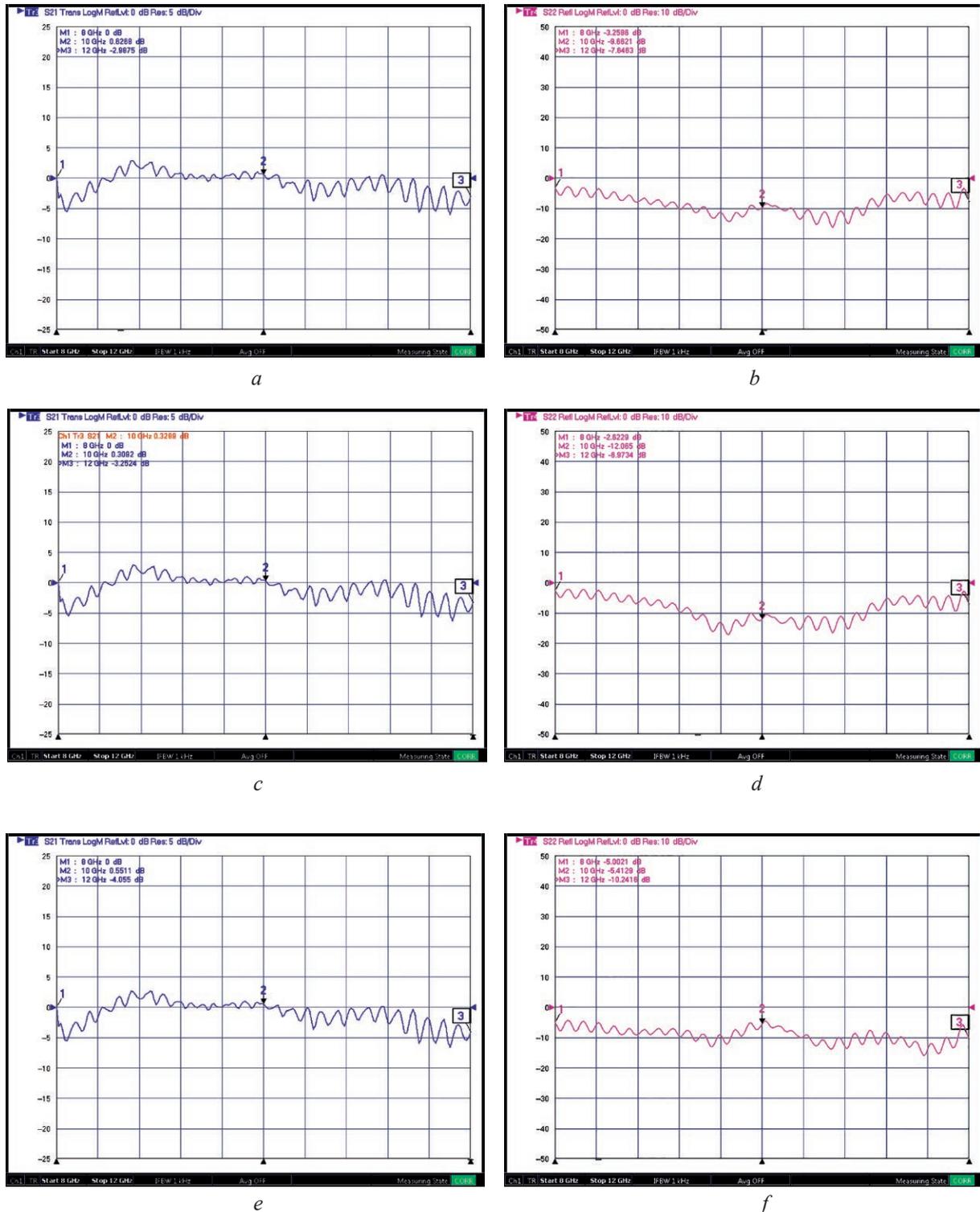


Рис. 6. Зависимости коэффициента ослабления макетных образцов P5 (a), P10 (c), P50 (e) и коэффициента отражения электромагнитного излучения P5 (b), P10 (d), P50 (f) от частоты в диапазоне 8–12 ГГц

Fig. 6. Dependences of the attenuation coefficient of prototype samples P5 (a), P10 (c), P50 (e) and the coefficient reflection of electromagnetic radiation P5 (b), P10 (d), P50 (f) on frequency in the range 8–12 GHz

Заключение

1. Исследованная пленка полианилина – электропроводящего полимера, нанесенная на подложку из стеклопластика, обладает малым затуханием, низким коэффициентом отражения электромагнитного излучения, высокими проводимостью и эксплуатационными характеристиками, технологичностью.

2. Многослойный электропроводящий материал – пленка полианилина – может использоваться в различных отраслях для решения следующих задач: обеспечение оптимальных условий эксплуатации устройств электроники, электро- и радиотехники на разных частотах и интенсивностях электромагнитного излучения для устранения нежелательных отражений сигналов; обеспечение минимального отражения электромагнитного излучения; создание локальных радиопоглощающих поверхностей на участках антенн, в корпусах и элементах оборудования; подавление поверхностных излучений в широком диапазоне частот и др.

Список литературы

1. Блайт, Э. Р. Электрические свойства полимеров / Э. Р. Блайт, Д. Блур. М.: Физматлит, 2008.
2. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. М.: Научные основы и технологии, 2009.
3. Schwartz, M. *Encyclopedia of Smart Materials* / M. Schwartz. New York: John Wiley and Sons, 2002.
4. Yu, K. Conductive Shape Memory Polymer Composite Incorporated with Hybrid Fillers: Electrical, Mechanical, and Shape Memory Properties / K. Yu, Y. Liu, J. Leng // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011. No 22. P. 369–379.
5. Yanilmaz, M. A Review: Effect of Conductive Polymers on the Conductivities of Electrospun Mats / M. Yanilmaz, A. S. Sarac // *Textile Research Journal*. 2014. Vol. 84, No 12. P. 1325–1342.
6. Muthukumar, N. Polyaniline-Coated Polyurethane Foam for Pressure Sensor Applications / N. Muthukumar, G. Thilagavathi, T. Kannaian // *High Performance Polymers*. 2015. Vol. 28, No 3. P. 1–8. DOI: 10.1177/0954008315583703.

References

1. Blythe E. R., Bloor D. (2008) *Electrical Properties of Polymers*. Moscow, Fizmatlit.
2. Mikhailin Yu. A. (2009) *Special Polymer Composite Materials*. Moscow, Scientific Bases and Technologies.
3. Schwartz M. (2002) *Encyclopedia of Smart Materials*. New York, John Wiley and Sons.
4. Yu K., Liu Y., Leng J. (2011) Conductive Shape Memory Polymer Composite Incorporated with Hybrid Fillers: Electrical, Mechanical, and Shape Memory Properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. (22), 369–379.
5. Yanilmaz M., Sarac A. S. (2014) A Review: Effect of Conductive Polymers on the Conductivities of Electrospun Mats. *Textile Research Journal*. 84 (12), 1325–1342.
6. Muthukumar N., Thilagavathi G., Kannaian T. (2015) Polyaniline-Coated Polyurethane Foam for Pressure Sensor Applications. *High Performance Polymers*. 28 (3), 1–8. DOI: 10.1177/0954008315583703.

Вклад авторов

Богуш В. А. осуществил постановку задачи, проанализировал и интерпретировал данные, отредактировал и окончательно утвердил рукопись для публикации, произвел ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Гусинский А. В. представил замысел и дизайн исследования электродинамических параметров электропроводящих полимеров.

Лабунов В. А. осуществил выработку технических требований к комплексу свойств композиционных структур для перспективных технологий создания материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением, проанализировал и интерпретировал данные.

Остальные авторы внесли равнозначный вклад в подготовку статьи.

Authors' contribution

Bogush V. A. carried out the statement of the problem, analyzed and interpreted the data, edited and finally approved the manuscript for publication, made its critical revision in terms of significant intellectual content.

Gusinsky A. V. presented the idea and design of the study of the electrodynamic parameters of electrically conductive polymers.

Labunov V. A. carried out the development of technical requirements for a set of properties of composite structures for advanced technologies for creating materials interacting with electromagnetic radiation, analyzed and interpreted the data.

The other authors made equal contributions to the preparation of the article.

Сведения об авторах

Богущ В. А., д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Гусинский А. В., д. т. н., доцент, начальник научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Карпович В. А., к. ф.-м. н., вед. н. с. экспериментальной базы «Свислочь» НАН Беларуси

Певнева Н. А., к. т. н., ст. н. с. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Родионова В. Н., к. ф.-м. н., вед. н. с. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Касперович М. М., науч. сотр. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кашко И. А., науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории интегрированных микро- и наносистем (НИЛ 4.6) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Грапов Д. В., науч. сотр. НИЛ 4.6 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Кукуть Ю. М., мл. н. с. НИЛ 4.6 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Лабунов В. А., академик Национальной академии наук Беларуси, д. т. н., профессор, заведующий НИЛ 4.6 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Певнева Наталья Алексеевна

Information about the authors

Bogush V. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Gusinsky A. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research and Production and Educational Innovative Center of Microwave Technologies and their Metrological Supply (Center 1.9) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Karpovich V. A., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Experimental Base "Svisloch" of the National Academy of Sciences of Belarus

Pevneva N. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Rodionova V. N., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kasperovich M. M., Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kashko I. A., Researcher at the Research Laboratory of Integrated Micro- and Nanosystems (Researcher Lab. 4.6) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Grapov D. V., Researcher at the Research Lab. 4.6 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kukut Yu. M., Junior Researcher at the Research Lab. 4.6 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Labunov V. A., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Research Lab. 4.6 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Pevneva Natalia Alekseevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-12-18>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.23; 539.24

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РОСТА 3C-SiC ПРИ БЫСТРОЙ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КРЕМНИЯ

М. В. ЛОБАНОК, П. И. ГАЙДУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 05.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры, фазового состава и кинетики роста эпитаксиальных слоев карбида кремния на кремниевых подложках при их быстрой вакуумно-термической обработке. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено формирование слоев кубического политипа SiC (3C-SiC) на кремнии при карбидизации в диапазоне температур 1000–1300 °С. Обнаружено, что формирование слоев SiC проходит в два этапа, характеризующихся различными энергиями активации. В более низкотемпературном диапазоне (1000–1150 °С) энергия активации процесса роста SiC составляет $E_a = 0,67$ эВ, тогда как в диапазоне 1150–1300 °С она увеличивается практически на порядок ($E_a = 6,3$ эВ), что указывает на смену лимитирующего физического процесса. Установлено, что тип проводимости и ориентация подложки оказывают влияние на толщину сформированных слоев SiC. При этом наибольшая толщина слоев карбида кремния достигается на кремниевых подложках с ориентацией (111) *p*-типа проводимости.

Ключевые слова: эпитаксиальные структуры SiC/Si, энергия активации, вакуумная карбидизация, быстрая термическая обработка, тонкие пленки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках проекта T22-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, а также частично проекта Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702). Авторы выражают благодарность М. А. Моховикову за помощь при проведении измерений методом просвечивающей электронной микроскопии.

Для цитирования. Лобанок, М. В. Температурная зависимость роста 3C-SiC при быстрой вакуумно-термической обработке кремния / М. В. Лобанок, П. И. Гайдук // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 12–18. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-12-18>.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF 3C-SiC GROWTH DURING RAPID VACUUM THERMAL SILICON TREATMENT

MIKHAIL V. LABANOK, PETER I. GAIDUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 05.05.2023

Abstract. The paper presents the results of a study of the structure, phase composition, and growth kinetics of silicon carbide epitaxial layers on silicon substrates during their rapid vacuum thermal treatment. Transmission electron microscopy revealed the formation of layers of the cubic polytype SiC (3C-SiC) on silicon during carbidization in the temperature range of 1000–1300 °C. It was found that the formation of SiC layers proceeds in two stages, characterized by different activation energies. In the lower temperature range from 1000 to 1150 °C, the activation

energy of the SiC growth process is $E_a = 0.67$ eV, while in the temperature range from 1150 to 1300 °C, the activation energy increases by almost an order of magnitude ($E_a = 6.3$ eV), which indicates a change in the limiting physical process. It has been established that the type of conductivity and the orientation of the substrate affect the thickness of the formed SiC layers. In this case, the greatest thickness of silicon carbide layers is achieved on silicon substrates with (111) orientation of *p*-type conductivity.

Keywords: epitaxial SiC/Si structures, activation energy, vacuum carbidization, rapid thermal processing, thin films.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The research was conducted in the framework of the T22-030 project of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, as well as, in part, the project of the state research program “Photonics and Electronics for Innovations” (project 3.1.2, No GR 20212702). The authors express their gratitude to M. Mokhovikov for his help in carrying out measurements by the method of transmission electron microscopy.

For citation. Labanok M. V., Gaiduk P. I. (2023) Temperature Dependence of 3C-SiC Growth During Rapid Vacuum Thermal Silicon Treatment. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 12–18. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-12-18> (in Russian).

Введение

Слои кубического политипа карбида кремния (3C-SiC), эпитаксиально выращенные на кремниевых подложках (Si), являются альтернативой сложным в производстве слиткам и подложкам монокристаллического SiC. Сформированные таким образом структуры 3C-SiC/Si перспективны для создания датчиков и приборов микроэлектроники, а также для интеграции SiC в кремниевую технологию [1]. В дополнение эпитаксиальные слои SiC, выращенные на Si-подложках, могут быть использованы в качестве буферов при выращивании активных гетероструктур на основе GaN [2], AlN, ZnO [1]. Гетероструктуры 3C-SiC/Si можно использовать при разработке гибридных силовых устройств, включающих первичный Si-IGBT с малым прямым током и вспомогательный SiC-MOS с большим прямым током. В [3, 4] отмечается, что в таких устройствах обеспечен компромисс между стоимостью силовых полупроводниковых приборов и их производительностью.

Вместе с тем получение качественных слоев SiC на Si является сложной задачей из-за существенного различия в кристаллических решетках и коэффициентах теплового расширения [1]. В настоящее время для улучшения качества гетероэпитаксиальных структур SiC/Si слои SiC выращивают в несколько стадий, на первой из которых формируют буферные слои SiC, которые принимают на себя нагрузку по релаксации механических напряжений, связанных с несоответствием параметров решетки и различием коэффициентов теплового расширения [5, 6]. В частности, установлено, что таким буфером может служить эпитаксиальный слой 3C-SiC, сформированный путем карбидизации кремния [5, 6]. Проводятся исследования и низкотемпературных режимов карбидизации кремния с варьированием концентрации углеродсодержащих газов и силанов, а также с использованием различных буферных слоев [6, 7]. При этом, по данным [6, 7], толщина сформированных слоев SiC не превышает несколько десятков нанометров, что может быть недостаточным для демпфирования напряжений, возникающих при последующем наращивании рабочих слоев SiC и GaN толщиной более 1 мкм [7].

Материалы и методы

В качестве подложек для формирования слоев SiC использовали монокристаллические пластины кремния с ориентацией поверхности вдоль (111) и (100), легированного фосфором (КЭФ) и бором (КДБ), обладающие примесной электронной (*n*-тип) и дырочной (*p*-тип) проводимостью соответственно. Перед помещением пластин в вакуумную камеру их поверхность обрабатывали в 5%-ном водном растворе плавиковой кислоты (HF:H₂O), промывали в деионизированной воде и осушали в потоке сухого азота. Процесс карбидизации проводили в вакуумной камере установки Jipelec Jetfirst 100. После установки пластин вакуумную камеру откачивали диффузионным насосом до давления $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Остаточная атмосфера содержала газовую смесь пропан-аргона (10 % C₃H₈/Ar), которая служила источником углеводородов. Процесс формирования слоев SiC методом быстрой вакуумно-термической карбидизации заключался в быстром (~20 °C/c) нагреве до выбранной температуры и выдерживании образцов при данной температуре в течение минуты. Температура карбидизации составляла 1000–1300 °C и контролировалась с помощью термопары и пирометра, включенных в обратную связь управления системой нагрева.

Структурно-фазовые характеристики сформированных слоев SiC исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) с использованием микроскопа Hitachi H-800 при ускоряющем напряжении 150 кэВ. Образцы для ПЭМ-исследований утонялись в виде планарных сечений методом химико-динамического травления в смеси концентрированных кислот $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:5$ со стороны Si-подложки. Исследования поверхностного микрорельефа образцов проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Hitachi S-4800. Для измерения толщины слоев SiC РЭМ-исследования проводили на образцах, приготовленных в виде поперечных сечений. Химические профили атомов (состав) и толщину слоев SiC определяли из спектров резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов He^+ с энергией 1,2 МэВ. Исследования РОР проводили с использованием ядерно-физического комплекса на основе электростатического ускорителя ионов AN-2500 фирмы High Voltage. При преобразовании шкалы энергий в шкалу глубин для полной обработки экспериментальных спектров РОР, а также для сравнения с теоретически моделированными спектрами использовали пакет расчетных программ HEAD6.

Результаты исследований и их обсуждение

Методом ПЭД установлено, что формирование слоев SiC на Si-подложках ориентаций (100) и (111) происходит во всем диапазоне температур 1000–1300 °С. В подтверждение этого на картинах электронной дифракции, представленных на рис. 1, обнаружены рефлексы $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$, которые обусловлены дифракцией электронов на кубическом политипе 3С-SiC ($a = 0,435$ нм), рефлексы $\{220\}$ на кремниевой подложке ($a = 0,543$ нм), а упорядоченное расположение рефлексов кремниевой подложки $\{220\}$ и слоя SiC $\{220\}$ свидетельствует о формировании эпитаксиального слоя SiC.

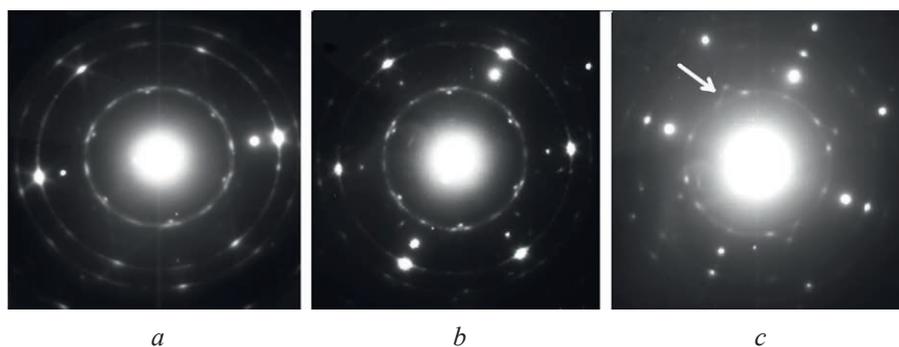


Рис. 1. Дифракционные картины структур SiC/S, сформированных на кремниевых подложках ориентаций (111) (a, b) и (100) (c) при температурах, °С: a – 1000; b – 1100; c – 1200

Fig. 1. Diffraction patterns of SiC/S structures formed on silicon substrates with (111) orientation (a, b) and (100) orientation (c) at temperatures, °С: a – 1000; b – 1100; c – 1200

На всех картинах электронной дифракции (рис. 1) хорошо различимы концентрические кольца различной интенсивности, которые указывают на наличие поликристаллической фазы SiC в слое карбида кремния. При этом относительная интенсивность колец и рефлексов изменяется в зависимости от температуры карбидизации кремния. Так, на ПЭД-микрофотографии структуры SiC/Si, сформированной при температуре 1000 °С (рис. 1, a), отчетливо видны кольца, обусловленные наличием заметного количества зерен поликристаллического SiC, а структура колец указывает на малый средний размер зерен SiC. При температуре 1100 и 1200 °С (рис. 1, b, c) интенсивность колец по сравнению с интенсивностью точечных рефлексов существенно снижается, что свидетельствует о том, что в данных температурных условиях формируется слой преимущественно монокристаллического SiC. Присутствие на снимках ПЭД (рис. 1, a–c) экстра-рефлексов является результатом дифракции на вторичных микродвойниках SiC во всех возможных плоскостях $\{111\}$. Наличие тяжей интенсивности на дифракционной картине, указанных стрелкой на рис. 1, c, а также анализ литературных данных [8] позволяют утверждать о формировании микродвойниковых ламелей SiC.

На рис. 2 приведены микрофотографии ПЭМ в светлом и темном полях, характеризующие сформированную структуру SiC/Si при 1100 °С.

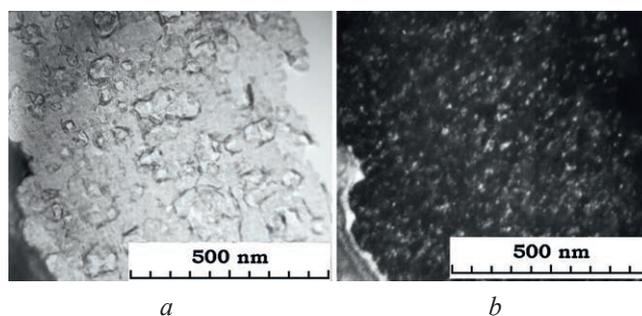


Рис. 2. ПЭМ-изображение эпитаксиального слоя SiC, выращенного на лицевой стороне подложки Si (100) при 1100 °С: *a* – в светлом поле; *b* – в темном поле

Fig. 2. TEM image of the SiC epitaxial layer grown on the front side of the Si (100) substrate at 1100 °С: *a* – in the bright field; *b* – in the dark field

На светлопольном изображении видны поры, геометрия которых связана с ориентацией подложки [9]. Темнопольное планарное изображение получено на дифракционном кольце 3С-SiC {111} (рис. 1, *b*). На темнопольной микрофотографии можно увидеть яркие светлые пятна, которые представляют собой изображения поликристаллических включений 3С-SiC {111}, имеющих размер от 5 до 50 нм.

На рис. 3 представлены типичные РЭМ-микрофотографии структур SiC/Si, выращенных путем быстрой вакуумной карбидизации при температурах 1000 °С (*a*) и 1100 °С (*b*). Видно, что формирование слоев SiC происходит в обоих образцах, однако степень покрытия поверхности оказывается различной. Так, термообработка при 1000 °С приводит к формированию слоев SiC с заметным количеством несплошностей, тогда как повышение температуры до 1100 °С сопровождается ростом почти сплошных слоев SiC, покрывающих поверхность. Одновременно в Si-подложке хорошо различаются поры субмикронных размеров, формирование которых, вероятно, связано с эффектом Киркендалла [9, 10]. В случае более высокотемпературного процесса (1200 °С) (рис. 3, *b*, *c*) происходит практически полное зарастание не только поверхности, но и пор таким образом, что слой SiC нарастает над порами в горизонтальном направлении и создает свободно нависающие мостиковые структуры без признаков их заметного провисания.

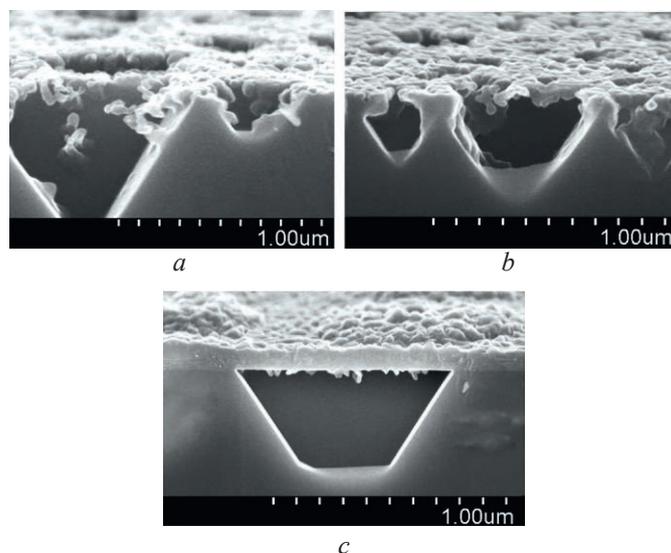


Рис. 3. Микрофотографии растровой электронной микроскопии структур SiC/Si, сформированных при температуре, °С: *a* – 1000; *b* – 1100; *c* – 1200

Fig. 3. Micrographs of scanning electron microscopy of SiC/Si structures formed at temperatures, °С: *a* – 1000; *b* – 1100; *c* – 1200

Согласно исследованиям [11], для внедряемых в кубические кристаллы атомов углерода в большом интервале температур выполняется закон Аррениуса

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где D_0 – предэкспоненциальный фактор; E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Результаты измерения толщины слоев SiC методами РЭМ и POP приведены на рис. 4 в виде линий Аррениуса, где представлены данные измерений слоев SiC, выращенных на пластинах n - и p -типов проводимости с ориентацией поверхности вдоль (111) и (100) плоскостей. Как видно из графиков, при изменении температуры процесса в пределах исследуемого диапазона 1000–1300 °С происходит переход из области с низкой энергией активации А в область с высокой энергией активации Б при температуре около 1150 °С. Расчеты по формуле (1) дают следующие значения энергии активации: для роста SiC в диапазоне температур 1000–1150 °С – $(0,67 \pm 0,07)$ эВ, для 1150–1300 °С – $(6,30 \pm 0,07)$ эВ. Эти значения хорошо согласуются с результатами исследований [12], где получены значения энергии активации роста SiC 0,76 и 3,10 эВ соответственно с переходом вблизи 1175 °С.

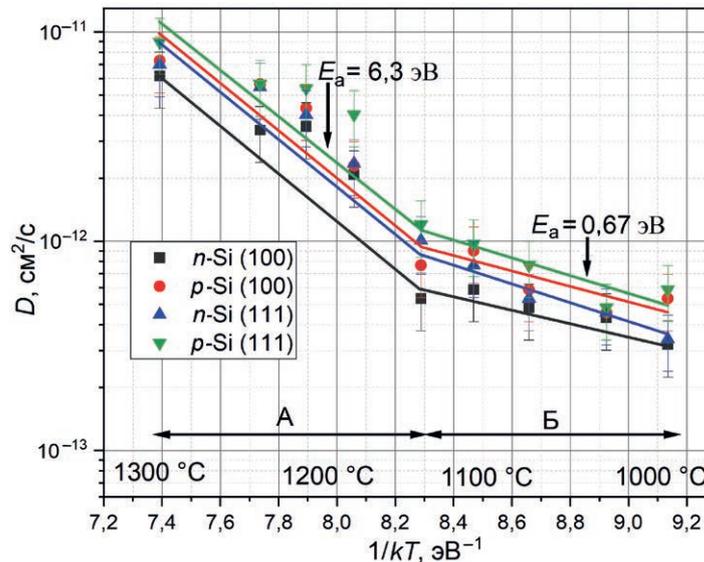


Рис. 4. Зависимости Аррениуса структур SiC/Si
Fig. 4. Arrhenius plots of SiC/Si structures

Анализ данных на рис. 4 в сочетании с результатами структурных исследований (рис. 1, 3) позволяет интерпретировать различие в энергиях активации с точки зрения диффузионно-лимитированного процесса роста слоев SiC. При низкотемпературной карбидизации сформированы более тонкие слои SiC, которые к тому же не являются сплошными, поэтому их рост, предположительно, лимитируется поверхностной диффузией атомов (малое значение E_a). Авторы [12] предположили, что в низкотемпературном процессе с энергией активации $E_a = 0,76$ эВ лимитирующим механизмом является поверхностная реакция кремния и углерода. В высокотемпературной области существенное увеличение энергии активации можно объяснить зарастиванием большей части несплошностей в слоях SiC и сменой диффузионного механизма. Необходимо отметить, что температурно-зависимое преобладание различных диффузионных процессов в SiC-структурах наблюдалось ранее в исследованиях других авторов. В частности, получены следующие значения энергии активации: объемной диффузии по вакансионному механизму в монокристалле SiC для атомов Si и C при 1327 °С – 6–8 эВ [13], поверхностной диффузии – 4,5–5,5 эВ [14]. Сравнивая значение полученной в данной статье энергии активации с данными других работ, можно предположить, что в высокотемпературной области вакуумной карбидизации лимитирующим механизмом является объемная диффузия вакансий.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, позволяет сделать вывод о сильной зависимости скорости роста слоев SiC от типа проводимости Si-подложки. Так, при идентичных условиях карбидизации (температура, длительность, вакуум) слои SiC, выращенные на Si-подложках p -типа проводимости, были более толстыми, чем на подложках n -типа. При этом в диапазоне температур 1000–1150 °С энергия активации роста SiC на Si-подложке p -типа проводимости составляла 0,67 эВ, тогда как на подложке n -типа – 0,40 эВ. Аналогичная тенденция зарегистрирована и в более высокотемпературном диапазоне (1150–1300 °С): энергия активации составляла 6,3 и 5,9 эВ соответственно для p - и n -типов проводимостей подложки. В [15] предполагалось, что различия в слоях SiC, сформированных на подложках разной проводимости, могут быть связаны с обра-

зованием центров дилатации (атома углерода в межузельной позиции и кремниевой вакансии). Более того, результаты исследований [14] показывают, что тип проводимости подложки оказывал влияние не только на толщину выращиваемых слоев SiC, но и на их структурно-фазовое состояние. Так, отмечалось, что электронограммы, полученные от слоев SiC, выращенных на подложках *p*-типа проводимости, содержат рефлексы, указывающие на формирование гексагональной фазы SiC. Стоит, однако, заметить, что границы раздела микродвойников в гранецентрированной кубической решетке также имеют строение гексагональной (вюрцитной) фазы [9], поэтому такой результат может свидетельствовать о более высокой плотности микродвойниковых частиц в слоях 3C-SiC, выращенных на подложках *p*-типа проводимости.

Из анализа графиков на рис. 4 можно сделать вывод о зависимости скорости роста слоев SiC от ориентации Si-подложки. Так, при идентичных условиях карбидизации слои SiC, выращенные на Si-подложках с ориентацией поверхности вдоль (111), были более толстыми, чем выращенные на подложках с ориентацией (100). При этом в диапазоне температур 1000–1150 °C энергия активации роста SiC на Si-подложке с ориентацией (111) составляла 0,40 эВ, тогда как на подложке с ориентацией (100) – 0,36 эВ. Аналогичная тенденция зарегистрирована и в более высокотемпературном диапазоне (1150–1300 °C) – энергия активации составляла 6,2 и 5,8 эВ соответственно для Si-подложки с ориентациями (111) и (100).

В [16, 17] отмечалось, что морфология и толщина слоев SiC зависят от ориентации кремниевой подложки. При интерпретации результатов авторы предполагали, что толщина слоя SiC зависит как от плотности поверхностных зародышей, так и от скорости диффузии атомов кремния к формируемому слою SiC. В свою очередь, плотность зародышей пропорциональна потоку атомов углерода к подложке и зависит от парциальных давлений в реакционной камере, тогда как поверхностная и объемная диффузия атомов углерода в кремнии является функцией температуры [17]. На начальном этапе карбидизации ориентационную зависимость можно объяснить особенностями поверхности кремния с разной кристаллографической ориентацией, связанными с количеством и направлением связей Si-Si в приповерхностных слоях подложки. У подложки с ориентацией поверхности вдоль (100) каждый поверхностный атом Si имеет две поверхностные оборванные связи, способные вступать во взаимодействие с атомами углерода, и две связи, соединяющие его с находящимися ниже атомами Si. В свою очередь, подложки с ориентацией (111) имеют лишь одну оборванную связь на поверхности, а для разрыва связей с расположенными ниже атомами Si требуется большая энергия. При этом такая оборванная связь направлена перпендикулярно подложке, в отличие от поверхностных оборванных связей на подложке с ориентацией (100), расположенных под углом 35° [16, 17], что, вероятно, способствует большей скорости взаимодействия этой плоскости с атомами углерода, поскольку имеется возможность заполнения практически всех свободных связей.

Заключение

1. Представлены результаты структурно-фазовых исследований эпитаксии слоев SiC, сформированных путем быстрой вакуумно-термической обработки кремния. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в диапазоне температур 1000–1300 °C за 30 с формируются ориентированные кристаллические слои кубического политипа SiC (3C-SiC) на кремнии.

2. На основании температурной зависимости средней толщины слоев SiC рассчитаны энергии активации процессов роста SiC. Обнаружено, что формирование слоев SiC проходит в два этапа, характеризующихся различными энергиями активации, а именно – в более низкотемпературном диапазоне 1000–1150 °C процесса роста SiC энергия активации $E_a = 0,67$ эВ, тогда как в диапазоне температур 1150–1300 °C она значительно больше – $E_a = 6,30$ эВ, что указывает на смену лимитирующего физического процесса.

3. Установлено, что тип проводимости и ориентация подложки оказывают влияние на формирование слоев SiC. При этом наибольшая толщина слоев SiC достигается на кремниевых подложках с ориентацией (111) *p*-типа проводимости.

Список литературы / References

1. Ferro G. (2015) 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: the Quest for Holy Grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. (76), 40–56. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Skibarko I. A., Milchanin O. V., Gaiduk P. I. et al. (1999) Structural and Optical Properties of GaN/SiC/Si Heterostructures Grown by MBE. *Inst.Phys.Conf.Ser.* 166, 465–469.

3. Fu Y., Ma Z., Ren H. (2022) A Low-Cost Compact SiC/Si Hybrid Switch Gate Driver Circuit for Commonly Used Triggering Patterns. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 37 (5), 5212–5223.
4. Deshpande A., Paul R., Emon A. I., Yuan Z., Peng H., Luo F. (2022) Si-IGBT and SiC-MOSFET Hybrid Switch-Based 1.7 kV Half-Bridge Power Module. *Power Electronic Devices and Components*. 3. DOI: 10.1016/j.pedc.2022.100020.
5. Zimbone M., Mauceri M., Litrico G., Barbagiovanni E. G., Bongiorno C., La Via F. (2018) Protrusions Reduction in 3C-SiC thin Film on Si. *Journal of Crystal Growth*. (498), 248–257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
6. Kuzmina V. O., Sinelnikov A. A., Soldatenko S. A., Sumets M. (2018) Activation Energy of Subgrain Growth Process and Morphology Evolution in β -SiC/Si (111) Heterostructures Synthesized by Pulse Photon Treatment Method in a Methane Atmosphere. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29 (23), 20097–20103. DOI: 10.1007/s10854-018-0141-7.
7. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Feoktistov N. A. (2014) ChemInform Abstract: Synthesis of Epitaxial Silicon Carbide Films Through the Substitution of Atoms in the Silicon Crystal Lattice: a Review. *Phys. Solid State*. (56), 1507–1535. DOI: 10.1134/S1063783414080137.
8. Jinschek J. R., Kaiser U., Richter W. (2001) Different Void Shapes in Si at the SiC Thin Film / Si (111) Substrate Interface. *Journal of Electron Microscopy*. 50 (1), 3–8. DOI: 10.1093/jmicro/50.1.3.
9. Booker G. R. (1964) Crystallographic Imperfections in Silicon. *Disc. Farad. Soc.* (38), 298–304.
10. Rao Juluri R., Gaiduk P. I., Hansen J. L., Larsen A. N., Julsgaard B. (2018) Impact of a SiGe Interfacial Layer on the Growth of a SiC Layer on Si with Voids at the Interface. *Thin Solid Films*. 662, 103–109. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.07.036.
11. Hashim A. M., Yasui K. (2008) Carbonization Layer Obtained by Acetylene Reaction with Silicon (100) and (111) Surface Using Low Pressure Chemical Vapor Deposition. *Journal of Applied Sciences*. (8), 3473–3478.
12. Steckl A., Li J. P. (1992) Effect of Carbonization Gas Precursor on the Heteroepitaxial Growth of SiC-on-Si by RTCVD. *Materials Research Society Proc.* (242), 537. DOI: 10.1557/PROC-242-537.
13. Backstedte M., Mattausch A., Pankratov O. (2003) Ab Initio Study of the Migration of Intrinsic Defects in 3C-SiC. *Physical Review B*. 68, 20. DOI: 10.1103/PhysRevB.68.205201.
14. Van Dijen F. K., Metselaar R. (1991) The Chemistry of the Carbothermal Synthesis of β -SiC: Reaction Mechanism, Reaction Rate and Grain Growth. *Journal of the European Ceramic Society*. 7 (3), 177–184.
15. Bessolov V. N., Grashchenko A. S., Konenkova E. V., Myasoedov A. V., Osipov A. V., Redkov A. V., Rodin S. N., Rubets V. P., Kukushkin S. A. (2015) The Effect of *n*- and *p*-type Conductivity of the Si (100) Substrate with a SiC Buffer Layer on the Growth Mechanism and Structure of Epitaxial Layers of Semipolar AlN and GaN. *Physics of the Solid State*. 59 (10), 1916–1921.
16. Severino A., D'Arrigo G., Bongiorno C., Scalese S., La Via F., Foti G. (2007) Thin Crystalline 3C-SiC Layer Growth Through Carbonization of Differently Oriented Si Substrates. *Journal of Applied Physics*. 102, 023518. DOI: 10.1063/1.2756620.
17. La Via F., Zimbone M., Bongiorno C., La Magna A., Fiscaro G., Deretzis I., Scuderi V., Calabretta C., Giannazzo F., Zielinski M., Anzalone R., Mauceri M., Crippa D., Scalise E., Marzegalli A., Sarikov A., Miglio L., Jokubavicius V., Syväjärvi M., Yakimova R., Schuh P., Schöler M., Kollmuss M., Wellmann P. (2021) New Approaches and Understandings in the Growth of Cubic Silicon Carbide. *Materials*. 14, 5348. DOI: 10.3390/ma14185348.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лобанок М. В., ст. преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

Гайдук П. И., д. ф.-м. н., профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 654-09-53
E-mail: mishalobanok@gmail.com
Лобанок Михаил Владимирович

Information about the authors

Labanok M. V., Senior Lecturer at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University

Gaiduk P. I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 29 654-09-53
E-mail: mishalobanok@gmail.com
Labanok Mikhail Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-19-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.216:546.824.31

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАБИЛЬНОГО СОСТАВА ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. ЗЕЛЕНИН¹, Е. О. НАРУШКО², А. Д. ГЛАДИНОВ³

¹Физико-технический институт НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «Пеленг» (г. Минск, Республика Беларусь)

³ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 17.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрены процессы формирования покрытий систем Cu–Ni и Ag–Cu стабильного элементного состава методом электронно-лучевого испарения. Показано, что в зоне воздействия электронного луча на помещенный в тигель слиток при суммарном давлении паров элементов сплава Σp больше давления под колпаком установки происходит кипение расплава, а в примыкающей к зоне расплава наружной зоне идет процесс сублимации твердого сплава. Исследованы микрорельеф и элементный состав поверхностного слоя слитка сплава Cu–Ni в зонах испарения и сублимации, а также элементный состав осаждаемых при этом покрытий. Показано, что наиболее приемлемым способом получения покрытий системы Cu–Ni стабильного элементного состава является одновременное электронно-лучевое испарение меди и никеля из двух тиглей. Рассчитан и экспериментально проверен азеотропный состав сплава системы Ag–Cu. Результаты исследований использованы при изготовлении многослойных экранов электромагнитного излучения.

Ключевые слова: покрытия систем Cu–Ni и Ag–Cu, электронно-лучевое испарение, сублимация, давление паров, стабильность элементного состава, экраны электромагнитного излучения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Зеленин, В. А. Получение многокомпонентных покрытий стабильного состава для экранов электромагнитного излучения / В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, А. Д. Гладинов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 19–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-19-27>.

OBTAINING MULTICOMPONENT COATINGS OF A STABLE COMPOSITION FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION SCREENS

VICTOR A. ZELENIN¹, ELENA O. NARUSHKO², ANTON D. GLADINOV³

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

²Joint-Stock Company “Peleng” (Minsk, Republic of Belarus)

³Joint-Stock Company “Instrument-Making Plant Opttron” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17.02.2023

Abstract. The formation processes of coatings of Cu–Ni and Ag–Cu systems with a stable elemental composition by the method of electron-beam evaporation are considered. It is shown that in the zone of action of the electron beam on the ingot placed in the crucible at the total vapor pressure of the alloy elements Σp above the pressure under the cap of the installation, the melt boils, and in the outer zone adjacent to the melt zone, the process of sубли-

mation of the hard alloy occurs. The microrelief and elemental composition of the surface layer of the Cu–Ni alloy ingot in the zones of evaporation and sublimation, as well as the elemental composition of the coatings deposited in this case, have been studied. It is shown that the most acceptable way to obtain coatings of the Cu–Ni system with a stable elemental composition is the simultaneous electron-beam evaporation of copper and nickel from two crucibles. The azeotropic composition of the alloy of the Ag–Cu system was calculated and experimentally verified. The research results are used in the manufacture of multilayered screens of electromagnetic radiation.

Keywords: coatings of Cu–Ni and Ag–Cu systems, electron-beam evaporation, sublimation, vapor pressure, elemental composition stability, electromagnetic radiation shields.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Zelenin V. A., Narushko E. O., Gladinov A. D. (2023) Obtaining Multicomponent Coatings of a Stable Composition for Electromagnetic Radiation Screens. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 19–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-19-27> (in Russian).

Введение

Нестабильность свойств тонких пленок меди вследствие их окисления при изготовлении многослойных экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) поставила на повестку дня задачу использования покрытий из сплавов систем Cu–Ni и Ag–Cu. Однако вследствие различного давления паров элементов при испарении происходит фракционирование сплавов этих систем, в результате элементные составы осаждаемых покрытий отличаются от составов испаряемых сплавов. Вопросы влияния условий испарения на элементный состав покрытий остаются в настоящее время малоизученными.

Известно, что азеотропность, или свойство сохранения стехиометрии при испарении, обусловлена более высокой прочностью химической связи между разнородными атомами сплава. Взаимодействия между компонентами сплава при совместном расплавлении влекут за собой изменение давлений паров, а, следовательно, влияют на стехиометрию парообразной фазы и соотношение элементов в осаждающейся пленке. В связи с этим элементный состав испаряемых сплавов должен соответствовать требованиям конгруэнтного испарения с учетом взаимодействия между компонентами и давления их паров [1–3]. Авторами исследованы процессы нанесения покрытий стабильного элементного состава методом электронно-лучевого испарения сплавов систем Cu–Ni и Ag–Cu, используемых при изготовлении многослойных экранов ЭМИ.

Процесс испарения сплавов системы Cu–Ni

Для получения покрытий с воспроизводимым соотношением элементов необходимо обеспечить соответствие состава паровой фазы при испарении составу сплава с учетом упругости паров компонентов. Зависимости давления (упругости) паров Cu, Ag и Ni от температуры, согласно [4], приведены на рис. 1.

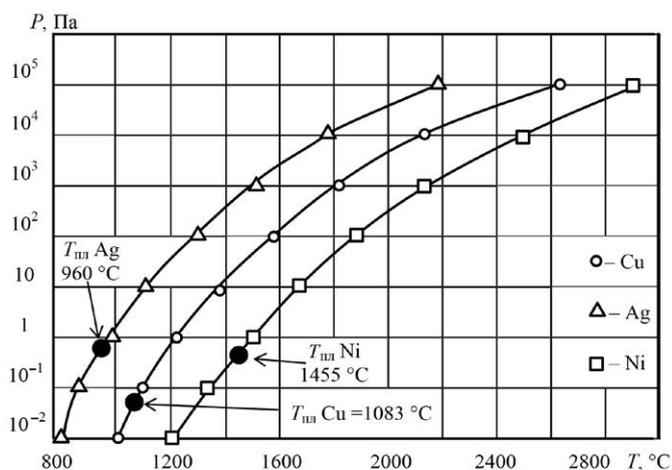


Рис. 1. Влияние температуры на давление паров Cu, Ag и Ni
Fig. 1. The effect of temperature on the vapor pressure of Cu, Ag and Ni

Как следует из рис. 1, давление паров Cu при температуре 1200 °С больше, чем у Ni, на два порядка. Поскольку покрытия формируют в вакууме, фазовые переходы жидкость→пар (ж→пар) и твердое тело→пар (тг→пар) имеют ряд особенностей. Для их рассмотрения представленная на рис. 2 диаграмма состояния системы Cu–Ni дополнена конодами и изобарами суммарного давления паров $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni})$. При температуре 1350 °С состояние сплавов характеризуется конодой АВ. Сплав состава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ находится в состоянии жидкого раствора, а состава $\text{Cu}_{33}\text{Ni}_{67}$ – твердого раствора.

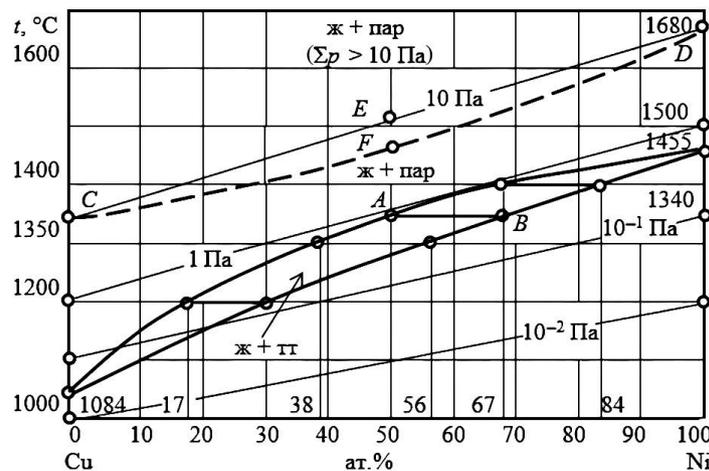


Рис. 2. Диаграмма состояния системы Cu–Ni с указанием изобар $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni})$
Fig. 2. State diagram of the Cu–Ni system showing isobars $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni})$

В соответствии с рис. 2 жидкие растворы в системе Cu–Ni при температуре 1200 °С образуются при содержании в сплавах Ni до 17 ат.%, при 1300 °С – до 38 ат.%, при 1400 °С – до 67 ат.%. Соответственно при содержании Ni более 30, 56 и 84 ат.% при тех же температурах сплавы находятся в состоянии твердых растворов. При температуре 1350 °С сплавы с содержанием Ni до 50 ат.% испаряются путем фазового перехода ж→пар, а с содержанием Ni более 67 ат.% сублимируют путем перехода тг→пар. Поскольку сплавы системы Cu–Ni являются неограниченными твердыми растворами, их испарение подчиняется закону Рауля, т. е. отношение числа атомов никеля n_{Ni} к числу атомов меди n_{Cu} в потоке пара в любой момент времени определяется выражением [3]

$$\frac{n_{\text{Ni}}}{n_{\text{Cu}}} = \frac{f_{\text{Ni}} x_{\text{Ni}} P_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}} x_{\text{Cu}} P_{\text{Cu}}} \cdot \left(\frac{A_{\text{Cu}}}{A_{\text{Ni}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где f_{Ni} , f_{Cu} – коэффициент активности атомов никеля и меди в расплаве; P_{Ni} , P_{Cu} – равновесное давление паров Ni и Cu при температуре испарения; A_{Ni} , A_{Cu} – атомная масса Ni и Cu ($A_{\text{Ni}} = 58,71$, $A_{\text{Cu}} = 63,54$); x_{Ni} , x_{Cu} – молярная концентрация Ni и Cu в сплаве, $x_{\text{Ni}} + x_{\text{Cu}} = 1$.

Давление паров Cu при температуре 1350 °С составляет ~10 Па, а паров Ni – 0,1 Па (рис. 1). В случае электронно-лучевого метода испарения в вакууме ($5 \cdot 10^{-3}$ Па) при температуре 1350 °С сплав $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ находится в состоянии кипения, т. е. пары Ni и Cu образуются не только на границе раздела жидкость–пар, но и во всем объеме расплавленной электронным лучом зоны. Отношение $\frac{f_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}}}$ в этом случае равно отношению объемов, занимаемых атомами Ni и Cu в расплаве,

т. е. $\frac{f_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}}} = \left(\frac{R_{\text{Ni}}}{R_{\text{Cu}}} \right)^3$, где R_{Ni} , R_{Cu} – радиусы атомов элементов вблизи температур их плавления,

$R_{\text{Ni}} = 0,1246$ нм, $R_{\text{Cu}} = 0,1280$ нм. Тогда, подставляя значения R_{Ni} и R_{Cu} , получаем $\frac{f_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}}} = 0,9224$ [5].

При подстановке всех значений в (1) получаем, что концентрация никеля в пленке составляет 0,96 ат.%, т. е. в ~50 раз меньше, чем в испаряемом сплаве.

Точки C и D на рис. 2 соответствуют температурам, при которых давления паров Cu и Ni равны 10 Па. Для идеальных растворов проходящая через эти точки изобара является прямой.

Отклонения от закона Рауля связаны с изменением прочности связей атомов Cu и Ni при смешении, а также с изменениями их активности. Более высокая активность атомов меди в расплаве, обусловленная большими их размерами, чем никеля, оказывает гораздо большее влияние на положение изобар. При повышении активности атомов меди их парциальное давление при испарении увеличивается. Изобара реальных сплавов смещается при этом вниз от прямой CD . Положение центральной точки F на изобаре (рис. 2), соответствующей суммарному давлению паров $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni}) = 10 \text{ Па}$, находится на $\sim 40^\circ \text{C}$ ниже точки E на прямой CD .

Процесс испарения сплавов системы Ag–Cu

Доработанная в процессе исследований диаграмма состояния системы Ag–Cu представлена на рис. 3.

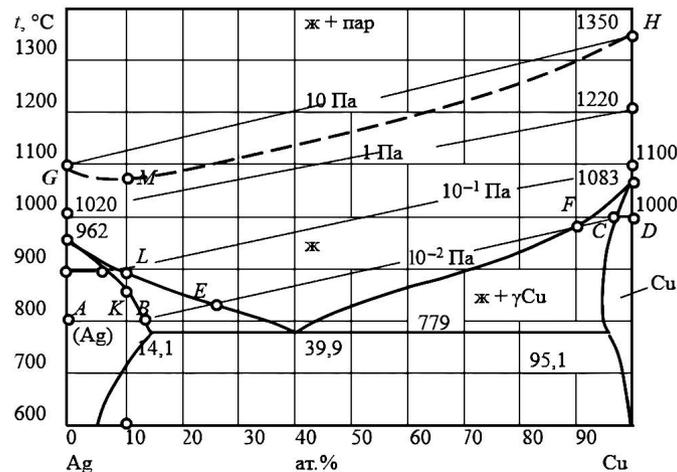


Рис. 3. Диаграмма состояния системы Ag–Cu
Fig. 3. State diagram of the Ag–Cu system

Требуемый диапазон суммарного давления паров $\Sigma p(\text{Ag}, \text{Cu}) = (1-10) \text{ Па}$, необходимого для получения пленок толщиной до 200 нм, достигается при температурах от 1100 до 1300 °C. Поскольку в системе Ag–Cu соединения не образуются, процесс испарения доэвтектических, эвтектических и заэвтектических сплавов подчиняется закону Рауля (1). Так как фазовый переход ж→пар происходит в вакууме ($5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$), а суммарное давление паров на 2–3 порядка больше, то расплавы находятся в состоянии кипения. Изобара AD , соответствующая давлению паров $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni}) = 10^{-2} \text{ Па}$, свидетельствует о том, что при температурах, ниже температуры плавления, происходят процессы сублимации твердого раствора меди в серебре (участок AB) и твердого раствора серебра в меди (участок CD). На участках BE и FC происходят процессы испарения жидкой фазы и сублимации твердых растворов, а участок EF соответствует кипению расплава. Коэффициенты активности атомов f_{Cu} и f_{Ag} при кипении определяются из формулы

$$\frac{f_{\text{Ag}}}{f_{\text{Cu}}} = \left(\frac{R_{\text{Ag}}}{R_{\text{Cu}}} \right)^3, \quad (2)$$

где R_{Ag} , R_{Cu} – радиус атома вблизи температуры плавления, $R_{\text{Ag}} = 0,1445 \text{ нм}$, $R_{\text{Cu}} = 0,1280 \text{ нм}$, тогда, подставляя значения R_{Ag} и R_{Cu} , получаем $\frac{f_{\text{Ag}}}{f_{\text{Cu}}} = 1,44$.

Средние значения давлений паров меди и серебра P_{Ag} в диапазоне температур от 1100 до 1300 °C составляют 8 и 50 Па, относительные атомные массы элементов Cu и Ag равны 63,54 и 107,87 соответственно. Подставляя все указанные значения в (1), при условии $\frac{n_{\text{Ag}}}{n_{\text{Cu}}} = 1$, получаем:

$$1,44 \cdot \frac{50}{8} \cdot \left(\frac{63,54}{107,87} \right)^{\frac{1}{2}} = 6,9 x_{\text{Ag}} = x_{\text{Cu}}.$$

Из условия $x_{\text{Ag}} + x_{\text{Cu}} = 1$ находим, что $x_{\text{Ag}} = 0,1$, $x_{\text{Cu}} = 0,9$.

Таким образом установлено, что азеотропным в системе Ag–Cu является сплав, содержащий 16 мас.% (10 ат.%) Ag и 84 мас.% (90 ат.%) Cu. При температурах ниже 850 °C сплав Ag₁₀Cu₉₀ находится в состоянии твердого раствора (рис. 3, точка *K*). Его сублимация происходит с несколько отличным соотношением паров Ag и Cu, чем при кипении, вследствие того, что активности этих элементов пропорциональны площадям, занимаемым атомами на сублимирующей поверхности. Эти площади определяются параметрами кристаллических решеток *a*, которые для Ag и Cu равны 0,4086 и 0,3615 нм соответственно:

$$\frac{f_{\text{Ag}}}{f_{\text{Cu}}} = \frac{a_{\text{Ag}}^2}{a_{\text{Cu}}^2} = \frac{0,4086^2}{0,3615^2} = 1,28.$$

Показанная пунктиром на рис. 3 изобара *GH*, соответствующая суммарному давлению паров $\Sigma p(\text{Ag}, \text{Cu}) = 10$ Па, проходит через минимум в точке *M*, соответствующей сплаву Ag₁₀Cu₉₀.

Материалы и методы исследования

Для приготовления сплавов систем Cu–Ni и Ag–Cu использовали медь марки М0 и никель марки Н0 согласно ГОСТ 492–2006 «Цветные металлы. Никель. Цинк. Технические условия. Марки» и сплав серебра с медью (92,5 мас.% Ag, 7,5 мас.% Cu, проба 925). Плавку проводили в модернизированной индукционной печи типа ИСВ 0.004. ПИМ1 в тиглях из диоксида циркония в атмосфере аргона. Из полученных отливок вырезали образцы массой до 5 г и после повторной их переплавки в вакууме ($1 \cdot 10^{-2}$ Па) в тиглях из спектрально чистого графита проводили электронно-лучевое испарение полученных вакуумным переплавом слитков. Пленки толщиной до 200 нм осаждали на подложки из монокристаллического кремния с предварительно выращенным на их поверхности слоем SiO₂ толщиной 0,4 мкм. Элементный состав поверхностных слоев извлеченного из тигля слитка сплава Cu₅₀Ni₅₀, а также осажденной при его испарении пленки толщиной 200 нм исследовали с помощью электронного микроскопа Tescan Mira 3, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments AZtecLive Standard с безазотным детектором Ultim MAX 100.

Результаты исследований и их обсуждение

Микрорельеф участков поверхности слитка сплава Cu₅₀Ni₅₀, сформированный при кристаллизации слитка в зонах кипения расплава (рис. 4, *a*), температура которых при прямом воздействии электронного луча была выше 1350 °C, и в зонах сублимации (рис. 4, *b*), температура которых была ниже линии солидуса, представлен на рис. 4.

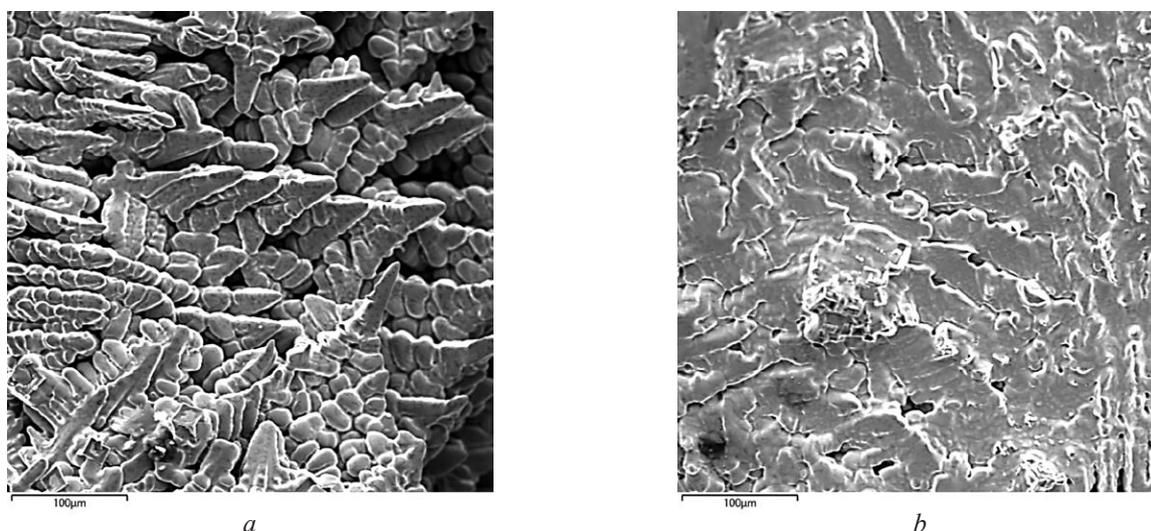


Рис. 4. Микрорельеф участков поверхности сплава Cu₅₀Ni₅₀, сформировавшихся при его: *a* – кипении, $T = 1400$ °C; *b* – сублимации, $T \approx 1300$ °C
Fig. 4. Microrelief of sections of the surface of the Cu₅₀Ni₅₀ alloy formed during its: *a* – boiling, $T = 1400$ °C; *b* – sublimation, $T \approx 1300$ °C

В зонах кипения сплава микрорельеф поверхности после кристаллизации слитка состоит из столбчатых кристаллитов конической формы с закругленными вершинами размерами от 10 до 70 мкм (рис. 4, а). В зонах сублимации формируется сглаженный микрорельеф поверхности, состоящий из кристаллитов размерами до 120 мкм с волнообразными границами между ними. Результаты исследований элементного состава поверхностных слоев слитка сплава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$, сформированных при кипении и сублимации, а также осажденного покрытия толщиной 200 нм, представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Таблица 1. Средние значения содержания элементов в зонах испарения и сублимации сплава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ и в пленке
Table 1. Average values of the content of elements in the zones of evaporation and sublimation alloy $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ and in film

Объект / Object	Содержание, мас.% / Content, wt.%					
	основных элементов / basic elements		примесей / impurities			
	Ni	Cu	C	O	Si	Прочие
Зона кипения	39,59	44,29	8,31	2,83	0,54	4,43
Зона сублимации	36,75	47,16	7,90	2,59	0,49	4,75
Покрытие (пленка)	0,89	61,11	9,12	0,89	26,46	1,53

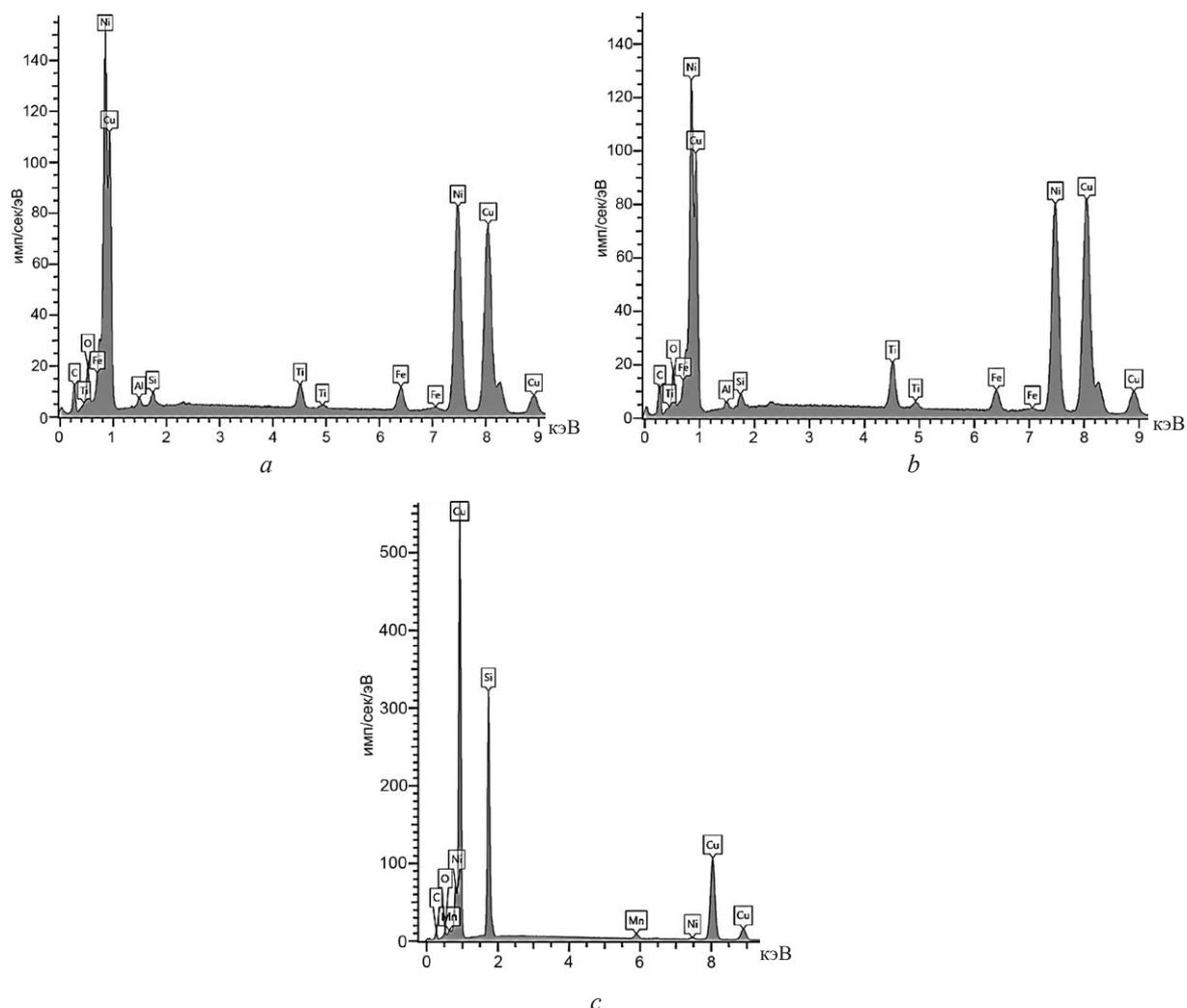


Рис. 5. Спектрограммы поверхностного слоя сплава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ в зонах кипения (а), сублимации (b) и покрытия (с), полученного методом электронно-лучевого испарения, мас.%

Fig. 5. Spectrograms of the surface layer of the $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ alloy in the zones of boiling (a), sublimation (b) and the film (c), obtained by electron beam evaporation, wt.%

Содержание основных элементов Cu и Ni в зоне кипения сплава Cu₅₀Ni₅₀ составило 49,2 и 50,8 ат.% соответственно, в зоне сублимации – 46 ат.% Ni и 54 ат.% Cu. Поскольку отношения активностей Ni и Cu при сублимации $\frac{f_{Ni}}{f_{Cu}} = \left(\frac{R_{Ni}}{R_{Cu}}\right)^2 = 0,9476$ больше, чем при кипении сплава $\left(\frac{f_{Ni}}{f_{Cu}} = 0,9224\right)$, поверхностный слой зоны сублимации обедняется никелем и обогащается медью. Элементный состав покрытия толщиной 200 нм более чем в 60 раз превышает содержание атомов никеля, что согласуется с проведенными выше расчетами.

Элементы Si и O на спектрограмме покрытия (рис. 5, с) присутствуют вследствие того, что толщина анализируемого при энергии электронов 20 кВ поверхностного слоя образца превышает толщину осажденного на кремниевую подложку покрытия. Углерод в пленке присутствует благодаря использованию графитовых тиглей.

Таким образом, экспериментально установлено, что при электронно-лучевом способе испарения сплавов системы Cu–Ni элементный состав покрытий существенно отличается от составов испаряемых сплавов. В связи с этим более приемлемый способ получения покрытий стабильного состава в системе Cu–Ni – одновременное параллельное электронно-лучевое испарение меди и никеля из двух тиглей. Как следует из рис. 1, при разнице температур испарения ~300 °С давления паров Cu (1300 °С) и Ni (1600 °С) примерно равны. Следовательно, состав покрытий в этом случае будет близок к эквиаtomному (Cu₅₀Ni₅₀). Преимущества последовательного нанесения слоев меди и никеля были использованы при разработке технологии изготовления многослойных тонкопленочных экранов ЭМИ [6].

Составы сплавов системы Ag–Cu, а также средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 50 нм, полученных методом электронно-лучевого испарения, приведены в табл. 2. Каждое значение рассчитано по данным анализа не менее трех образцов. Из табл. 2 следует, что при атомном соотношении элементов в сплаве Cu:Ag = 90:10 такое же соотношение элементов сохраняется и в покрытии, т. е. происходит конгруэнтное испарение сплава. При отклонении от расчетного соотношения элементов Ag и Cu происходит фракционирование сплава с соответствующим изменением элементного состава покрытия.

Таблица 2. Составы сплавов системы Ag–Cu и средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 50 нм, полученных электронно-лучевым испарением
Table 2. Compositions of alloys of the Ag–Cu system and average contents of elements in 50 nm thick coatings obtained by electron-beam evaporation

Элементный состав сплава, ат.% / Elemental composition of the alloy, at.%		Состав покрытия толщиной 50 нм, ат.% / Coating composition of 50 nm thickness, at.%		
Ag	Cu	Ag	Cu	Прочие
30	70	45,4	51,5	3,1
20	80	28,0	67,8	4,2
10	90	10,0	84,2	5,8
5	95	3,4	90,3	6,3

Заключение

1. Рассмотрены процессы формирования покрытий систем Cu–Ni и Ag–Cu стабильного элементного состава методом электронно-лучевого испарения. Исследованы микрорельеф и элементный состав поверхностного слоя сплавов в зонах их испарения и сублимации, а также элементный состав осаждаемых покрытий. Предложен способ получения пленок стабильного состава в системе Cu–Ni, заключающийся в одновременном электронно-лучевом испарении меди и никеля из двух тиглей.

2. Рассчитан и экспериментально проверен азеотропный состав сплава системы Ag–Cu. Результаты исследований использованы при разработке составов и технологии изготовления тонкопленочных экранов электромагнитного излучения. Получены патенты Республики Беларусь на экранирующие покрытия, содержащие слои из сплавов азеотропных составов [7, 8].

Список литературы

1. Зеленин, В. А. Силицидные сплавы азеотропных и эвтектических составов для катодов и мишеней вакуумно-дуговых и магнетронных установок / В. А. Зеленин // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. в 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы; редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2021. С. 208–223.*
2. Оптически прозрачные электромагнитные экраны / А. Т. Волочко [и др.] // *Доклады БГУИР. 2015. № 3. С. 53–57.*
3. Зеленин, В. А. Высокостабильные элементы и структуры для изделий наноэлектроники / В. А. Зеленин. Минск: Беларус. навука, 2022. 290 с.
4. Несмеянов, А. Н. Давление пара химических элементов / А. Н. Несмеянов. М.: Изд. АН СССР, 1961. 397 с.
5. Гладинов, А. Д. Расчет концентраций и температур плавления высококремнистых эвтектик в системах P3M–Si / А. Д. Гладинов // *Литье и металлургия 2019: сб. науч. работ II Междунар. науч.-практ. интернет-конф. студ. и магистр., 16–17 окт. 2019 г.; ред. А. П. Божок, И. А. Иванов. Минск: БНТУ, 2019. С. 62–63.*
6. Влияние режимов формирования на структуру тонких покрытий, используемых в многослойных экранах ЭМИ / Е. О. Нарушко [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. ФТИ НАН Беларуси. Минск, 2019. С. 60–66.*
7. Защитное экранирующее покрытие дисплея: пат. 23414 Респ. Беларусь, МПК G 12B 17/02, H 01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44 // А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, Г. В. Марков; заявитель Физико-технический институт НАН Беларуси», № а 20190321. заявл. 14.11.2019; опубл. 30.06.2021 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. С. 10.*
8. Экранирующее покрытие дисплея: пат. 23435 Респ. Беларусь, МПК G 12B 17/02, H01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44 / А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, Г. В. Марков; заявитель Физико-технический институт НАН Беларуси; № а 20190320, заявл. 14.11.2019; опубл. 30.06.2021 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2021. С. 6.*

References

1. Zelenin V. A. (2021) Silicide Alloys of Azeotropic and Eutectic Compositions for Cathodes and Targets of Vacuum-Arc and Magnetron Installations. *Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials. Sat. Scientific Works. In 2 Books. Book 1. New Technologies and Materials.* Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ. 208–223 (in Russian).
2. Volochko A. T., Zelenin V. A., Markov G. V., Narushko E. O. (2015) Optically Transparent Electromagnetic Screens. *Doklady BGUIR.* (3), 53–57 (in Russian).
3. Zelenin V. A. (2022) *Highly Stable Elements and Structures for Nanoelectronic Products.* Minsk, Belarusian Science Publ. 290 (in Russian).
4. Nesmeyanov A. N. (1961) *Vapor Pressure of Chemical Elements.* Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 397 (in Russian).
5. Gladinov A. D., Zelenin V. A. (2019) Calculation of Concentrations and Melting Temperatures of High-Silicon Eutectics in the P3M–Si Systems. *Casting and Metallurgy, Collection of Scientific Works of the II International Scientific and Practical Internet-Conference Among Students and Master's Students, Oct. 16–17, 2019.* Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 62–63 (in Russian).
6. Narushko E. O., Volochko A. T., Zelenin V. A., Markov G. V. (2019) Influence of Formation Modes on the Structure of Thin Coatings Used in EMI Multilayer Screens. *Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials, Sat. Scientific Papers Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus.* Minsk. 60–66 (in Russian).
7. Volochko A. T., Zelenin V. A., Narushko E. O., Markov G. V. (2019) Protective Screening Coating of the Display. *Patent 23414 Rep. Belarus, IPC G 12B 17/02, H 01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44. Applicant Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, No a 20190321, App. 14.11.2019, Publ. 30.06.2021.* Afitsyyny Bul., National Center Intellectual. Ulasnastsi. 10 (in Russian).
8. Volochko A. T., Zelenin V. A., Narushko E. O., Markov G. V. (2021) *Shielding Display Coating. US Patent 23435 Rep. Belarus, IPC G 12B 17/02, H01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44. Applicant Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, No a 20190320, App. 14.11.2019. Publ. 30.06.2021.* Afitsyyny Bul., National Center intellectual. Ulasnastsi. 6 (in Russian).

Вклад авторов

Зеленин В. А. разработал диаграммы состояния, дополненные изобарами и конодами, подготовил рукопись статьи.

Нарушко Е. О. разработала сплавы азеотропных составов.
Гладинов А. Д. исследовал микрорельефы поверхностей образцов после их сублимации и испарения.

Authors' contribution

Zelenin V. A. developed state diagrams, supplemented by isobars and conodes, prepared the manuscript of the article.

Narushko E. O. developed alloys of azeotropic compositions.

Gladinov A. D. studied the microreliefs of the surfaces of samples after their sublimation and evaporation.

Сведения об авторах

Зеленин В. А., д. т. н., доцент, гл. н. с. Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси

Нарушко Е. О., к. т. н., инженер-технолог ОАО «Пеленг»

Гладинов А. Д., мл. н. с. ОАО «Приборостроительный завод Оптрон»

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Академика Высоцкого, 3–26
Тел.: +375 29 345-86-72
E-mail: lena-narushko@mail.ru
Нарушко Елена Олеговна

Information about the authors

Zelenin V. A., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Principal Researcher at the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Narushko E. O., Cand. of Sci., Process Engineer at the Joint-Stock Company “Peleng”

Gladinov A. D., Junior Researcher at the Joint-Stock Company “Instrument-Making Plant Optron”

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, Academician Vysotsky St., 3–26
Tel.: +375 29 345-86-72
E-mail: lena-narushko@mail.ru
Narushko Elena Olegovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-28-32>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ФИКСИРОВАННОГО ЗАРЯДА В СЛОЕ SiO_2 , ПОЛУЧЕННОМ ТЕРМИЧЕСКИМ ОКИСЛЕНИЕМ КРЕМНИЯ

В. А. ПИЛИПЕНКО, А. А. ОМЕЛЬЧЕНКО

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 04.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Твердофазная рекристаллизация поверхностного слоя кремния после химико-механической полировки с использованием быстрой термической обработки импульсами секундной длительности – один из возможных путей улучшения поверхностных свойств кремния. Рассмотрено влияние быстрой термической обработки, приводящей к твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя, на формирование фиксированного заряда в SiO_2 при термическом окислении кремния. Приведены результаты исследования пластин кремния электронного, легированного фосфором (КЭФ 4,5), и кремния дырочного, легированного бором (КДБ 12), ориентации $\langle 100 \rangle$ диаметром 100 мм после химико-механической полировки. Методом вольт-фарадных характеристик определялись напряжение плоских зон и плотность заряда на границе раздела «кремний – диоксид кремния», методом сканирующей зондовой электрометрии – поверхностное распределение этих характеристик до и после быстрой термообработки. Установлено, что быстрая термообработка на кремниевых пластинах КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации $\langle 100 \rangle$ за счет твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя приводит к уменьшению поверхностного потенциала по площади пластин и остаточного фиксированного заряда в диоксиде кремния в полтора раза.

Ключевые слова: подзатворный диэлектрик, фиксированный заряд, быстрая термообработка, вольт-фарадная характеристика, поверхностный потенциал, твердофазная рекристаллизация, междоузельный атом кремния.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пилипенко, В. А. Механизм формирования фиксированного заряда в слое SiO_2 , полученном термическим окислением кремния / В. А. Пилипенко, А. А. Омельченко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С.28–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-28-32>.

MODEL OF THE FORMATION OF A FIXED CHARGE IN SiO_2 , PRODUCED BY THERMAL OXIDATION OF SILICON

ULADZIMIR A. PILIPENKA, HANNA A. AMELCHANKA

JOINT STOCK COMPANY “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 04.05.2023

Abstract. Solid-state recrystallization of the surface silicon layer after chemical and mechanical polishing with application of fast thermal treatment by pulses of one second duration is one of the feasible methods of improving the silicon surface properties. The purpose of this work is to explore the impact of fast thermal treatment resulting in solid state recrystallization of mechanically disrupted layer on generation of fixed charge in SiO_2 at thermal oxidation of silicon. The results of studying P-doped electron silicon (KEF 4.5) and B-doped hole silicon (BDS 12) hole-type silicon of orientation $\langle 100 \rangle$ diameter 100 mm after chemical and mechanical polishing are provided.

By the method of voltage-capacitance characteristic the flat zones voltage and charge density on the boundary of “silicon – silicon dioxide” were determined and by the method of scanning probe electrometry the surface distribution of these characteristic prior and after fast thermal treatment was determined. It has been ascertained that fast thermal treatment on silicon wafers KEF 4.5 and BDS 12 of orientation $\langle 100 \rangle$ due to solid state recrystallization of mechanically disrupted layer shall bring about 1.5 times decrease in surface potential along wafers area and residual fixed charge in silicon dioxide.

Keywords: gate dielectric, fixed charge, rapid heat treatment, voltage-capacitance characteristic, surface potential, solid-state recrystallization, interstitial atom of silicon.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pilipenka U. A., Amelchanka H. A. (2023) Model of the Formation of a Fixed Charge in SiO_2 , Produced by Thermal Oxidation of Silicon. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 28–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-28-32> (in Russian).

Введение

Важную роль в надежности создаваемой электронной элементной базы играют зарядовые свойства границы раздела Si-SiO_2 , которые в наибольшей степени касаются изделий, изготовленных с применением металл-окисел-полупроводник-структурных (МОП-структурных) и комплементарных МОП-структурных (КМОП) технологий. Это обусловлено тем, что зарядовые свойства определяют как время наработки на отказ подзатворного диэлектрика, так и зависимость характеристик приборов от условий их эксплуатации [1, 2].

Известно, что при термическом окислении кремния в SiO_2 формируется положительный фиксированный заряд, а также заряд быстрых поверхностных состояний. Величины данных зарядов изменяются при повышенных температурах и напряжениях, приводя к изменению характеристик электронной элементной базы, тем самым снижая ее надежность [3, 4]. В настоящее время имеется большое количество качественных моделей, объясняющих появление фиксированного заряда в SiO_2 , например, наличие примесей металлов [4], заряженных атомов кремния или Si-O -комплексов [5] и ряд других.

Повышение качества современной технологии практически полностью устранило вышеуказанные причины возникновения фиксированного заряда, однако его формирование продолжает иметь место. Это указывает на несоответствие данных моделей причинам образования такого заряда. Наиболее адекватная аналитическая модель образования фиксированного заряда и его математическое описание предложены в [5].

В статье основная причина формирования фиксированного заряда связывается с возникновением неравновесной концентрации межузельных атомов кремния и их диффузией как вглубь окисла, так и к границе Si-SiO_2 с последующей рекомбинацией на ней. Однако, несмотря на хорошее соответствие данной модели экспериментальным результатам, она не смогла описать существование остаточного фиксированного заряда в оксиде после его отжига. В этой связи выяснение причины и механизма образования такого заряда – актуальный вопрос, который необходимо решить для определения пути его (заряда) устранения.

Проведение исследований

В качестве образцов для исследования использовались пластины кремния электронного, легированного фосфором (КЭФ 4,5), и кремния дырочного, легированного бором (КДБ 12), ориентации $\langle 100 \rangle$ диаметром 100 мм после химико-механической полировки. Часть пластин проходила быструю термообработку (БТО) в естественных атмосферных условиях путем облучения с рабочей стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры 1000 °С. Затем методом пирогенного окисления при 850 °С в течение 40 мин формировался подзатворный диэлектрик толщиной 42,5 нм и методом вольт-фарадных характеристик определялись напряжение плоских зон и плотность заряда на границе раздела «кремний – диоксид кремния». Для изучения их распределения по поверхности пластины и определения относительных изменений данных параметров после различных видов обработки использовали метод сканирующей зондовой электрометрии, основанный на определении контактной разности потенциалов (КРП) [6].

Предложенная в [5] модель формирования фиксированного заряда строилась на предположении, что на поверхности кремниевой пластины отсутствует механически нарушенный слой кремния, и за образование данного заряда в SiO_2 отвечают междоузельные атомы (МА) кремния. Величина заряда определяется количеством однократно ионизованных МА кремния вблизи межфазной границы, которые оказываются там за счет их генерации на данной границе и диффузии вглубь окисла. Согласно представленному механизму формирования фиксированного заряда, его образование обусловлено преобладанием скорости генерации МА кремния над их последующей рекомбинацией на межфазной границе. Уменьшение величины фиксированного заряда и плотности быстрых поверхностных состояний с ростом температуры процесса окисления связано с увеличением коэффициента диффузии МА кремния.

Однако, как было показано в [7], на поверхности кремниевой пластины после финишной полировки остается слой толщиной от 5 до 100 нм, представляющий собой механически деформированную кристаллическую решетку. Это означает, что энергия связи Si–Si в такой кристаллической решетке будет меньше, чем в решетке без ее деформации. Поскольку за формирование фиксированного заряда в SiO_2 отвечают МА кремния и их концентрация на межфазной границе, следовательно, чем выше скорость их генерации, тем больше фиксированный заряд в SiO_2 . Учитывая, что наличие деформированного слоя на поверхности пластины приводит к увеличению скорости генерации МА за счет пониженной энергии связи Si–Si, это будет приводить к увеличению значения данного заряда. Это означает, что на пластинах, имеющих механически нарушенный слой, величина фиксированного заряда должна быть больше, чем на пластинах с недеформированной кристаллической решеткой на окисляемой поверхности.

С другой стороны, величина фиксированного заряда в SiO_2 также зависит от микроискажений структуры двуокиси кремния, получаемой путем термического окисления кремния. Поскольку рост толщины окисла на 44 % [8] идет за счет подложки кремния, у которой на поверхности находится слой с деформированной кристаллической решеткой, для его полного участия в процессе окисления толщина выросшего оксида, согласно расчету, должна составлять от 0,01 до 0,22 мкм при толщине деформированного слоя от 5 до 100 нм соответственно. Это означает, что верхняя часть диэлектрика, сформированная за счет деформированной кристаллической решетки кремния, будет иметь нарушенную микроструктуру. Это обусловлено уменьшением в ней силы связей Si–O, оборванными связями Si, не заполненными кислородом, изменением углов связей Si–O. Следовательно, весь оксид можно рассматривать как двуслойную систему с различной микроструктурой по толщине. Поскольку такие микроискажения структуры SiO_2 тоже приводят к возникновению фиксированного заряда, его природа в этой части диэлектрика будет определяться как структурой диэлектрика, так и механизмом образования МА кремния. В этой связи наблюдаемый в [5] остаточный фиксированный заряд в SiO_2 после отжига может быть обусловлен микроискаженной структурой верхней части диэлектрика, которая сохраняется и после отжига.

Для подтверждения предполагаемого механизма образования фиксированного заряда в SiO_2 при термическом окислении кремния были подготовлены образцы с оксидом толщиной 42,5 нм на кремниевых пластинах КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации $\langle 100 \rangle$. Перед окислением половина всех пластин подвергалась БТО при 1000 °С в течение 7 с путем их фотонного облучения с рабочей стороны пластины. Такая обработка обеспечивала значительное уменьшение толщины деформированного слоя на поверхности пластины (твердофазная рекристаллизация) [9], что позволило определить его роль в формировании фиксированного заряда. С этой целью измеряли плотность заряда, напряжение плоских зон и КРП. После данных измерений проводилась БТО всех пластин при 1000 °С в течение 7 с для отжига фиксированного заряда и осуществлялись повторные измерения всех вышеуказанных параметров (табл. 1).

Исследование вольт-фарадных характеристик пленок SiO_2 на пластинах, прошедших быструю термообработку, показывает значительное улучшение их параметров. Наблюдается уменьшение как напряжения плоских зон, так и плотности заряда на границе раздела «кремний – диоксид кремния».

Таблица 1. Электрофизические параметры системы Si–SiO₂ до и после быстрой термообработки (БТО), сформированной на кремнии с его предварительной быстрой термообработкой и без нее
Table 1. Electrophysical parameters of Si–SiO₂ system before and after rapid heat treatment (RHT) formed on silicon with its preliminary rapid heat treatment and without it

Параметр двуоксида кремния / Parameter of silicon dioxide		Тип пластины / Insert type			
		КЭФ 4,5 / 4.5 P-Doped Electron Silicon		КДБ 12 / 12 B-Doped Silicon	
		без БТО / no RHT	с БТО / with RHT	без БТО / no RHT	с БТО / with RHT
Толщина пленки, нм	до БТО	48,05	48,13	48,42	48,48
	после БТО	45,74	45,92	45,88	45,55
Напряжение плоских зон, В	до БТО	–0,331	–0,324	–1,837	–1,773
	после БТО	0,005	–0,017	–1,254	–1,187
Плотность заряда, см ^{–2}	до БТО	5,26 · 10 ¹⁰	3,41 · 10 ¹⁰	3,80 · 10 ¹¹	3,52 · 10 ¹¹
	после БТО	1,43 · 10 ¹⁰	1,33 · 10 ¹⁰	1,16 · 10 ¹¹	8,16 · 10 ¹⁰

Анализ результатов исследований

Анализ пространственного распределения КРП по площади пластины показал, что его величина на пластинах, прошедших такую обработку, меньше, чем на пластинах, не проходивших ее. Так, для пластин КЭФ 4,5 КРП уменьшился с (–1,211) до (–1,134) В, а для КДБ 12 – с (–0,725) до (–0,359) В. Данные изменения поверхностного потенциала по площади пластины соответствуют уменьшению работы выхода электронов с поверхности и позволяют говорить об улучшении свойств границы раздела «кремний – диоксид кремния» после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры поверхностного слоя диоксида кремния.

Проведение БТО структур Si–SiO₂, полученных на кремниевых пластинах с предварительной БТО рабочей поверхности и без такой обработки, показало, что во всех случаях имеет место отжиг фиксированного заряда. Так, в случае КЭФ 4,5 напряжения плоских зон уменьшились более чем на порядок, а плотность заряда снизилась в 3,7 раза. В случае КДБ 12 уменьшение данных величин составило 1,5 и 4,3 раза соответственно. При этом проведение БТО кремниевых пластин перед окислением позволяет уменьшить остаточный фиксированный заряд в 1,5 раза. Анализ распределения поверхностного потенциала показал, что проведение БТО пластин после окисления обеспечивает равномерное его распределение по площади пластины независимо от БТО исходных подложек. Подтверждением роли механически нарушенного слоя в формировании остаточного фиксированного заряда в SiO₂ является то, что на пластинах с предварительной обработкой заряд в пленке как после окисления, так и после БТО меньше, чем на пластинах без предварительной быстрой термообработки.

Заключение

Быстрая термообработка, обеспечивающая нагрев пластины до 1000 °С за 7 с, в результате твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя приводит к уменьшению поверхностного потенциала по площади пластин, а также уменьшает остаточный фиксированный заряд в полтора раза. Уменьшение поверхностного потенциала по площади пластин соответствует сокращению работы выхода электронов с поверхности и позволяет говорить об улучшении свойств границы раздела «кремний – диоксид кремния» при быстрой термообработке исходных кремниевых пластин за счет значительного повышения однородности микроструктуры поверхностного слоя диоксида кремния.

Список литературы

1. Солодуха, В. А. Основы силовой электроники / В. А. Солодуха [и др.]. М.: Техносфера, 2019. 424 с.
2. Харченко, В. А. Проблемы надежности электронных компонентов / В. А. Харченко // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 52–57.
3. Deal, B. E. Standardized Terminology for Oxide Charges Associated with Thermally Oxidized Silicon / B. E. Deal // IEEE Trans. Electron Devices. 1980. Vol. ED-27. P. 606–610.
4. Красников, Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2 ч. / Г. Я. Красников. М.: Техносфера, 2002. Ч. 1. 416 с.

5. Александров, О. В. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния / О. В. Александров, А. И. Дусь // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 4. С. 474–480.
6. Контроль дефектов структуры кремний–диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р. И. Воробей [и др.] // Приборы и методы измерений. 2013. Т. 7, № 2. С. 67–72.
7. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. В 3 т. / О. Ю. Наливайко [и др.]; под ред. А. С. Турцевича. Минск: Интегралполиграф, 2013. Т. 1. 704 с.
8. Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства / А. П. Достанко [и др.]; под ред. А. П. Достанко. Минск: Беларус. навука, 2020. 283 с.
9. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2018. Т. 62, № 3. С. 347–352.

References

1. Solodukha B. A., Pilipenko V. A., Belous A. I., Efimenko S. A. (2019) *Fundamentals of Power Electronics*. Moscow, Technospha Publ. 424 (in Russian).
2. Kharchenko V. A. (2015) Problems of Reliability of Electronic Components. *News of Universities. Materials of Electronic Devices*. 18 (1), 52–57 (in Russian).
3. Deal B. E. (1980) Standardized Terminology for Oxide Charges Associated with Thermally Oxidized Silicon. *IEEE Trans. Electron Devices*. ED-27, 606–610.
4. Krasnikov G. Y. (2002) *Architectural and Technological Peculiarities of Submicron MOS Transistors. Part 1*. Moscow, Technospha Publ. 416 (in Russian).
5. Alexandrov O. V., Duss A. I. (2011) Model of Generation of Fixed Charge in Thermal Silicon Dioxide. *Physics and Technology of Semiconductors*. 45 (4), 474–480 (in Russian).
6. Vorobei R. I., Zharin A. L., Gussev O. K., Petlitsky A. N., Pilipenko V. A., Turtsevich A. S., Tiavlovski A. K., Tiavlovski K. L. (2013) Defects Inspection of Silicon-Insulator Structure Based on the Analysis of Spatial Potential Distribution on the Surface of Semiconductor. *Devices and Measurement Methods*. 7 (2), 67–72 (in Russian).
7. Nalivaiko O. Y., Solodukha V. A., Pilipenko V. A. [et al.] (2013) *Essential Technological Processes of Semiconductor Devices Fabrication and Integral Microcircuits on Silicon. Vol. 1*. Minsk, Integralpoligraph Publ. 704 (in Russian).
8. Dostanko A. P. [et al.] (2020) Innovative Technologies and Equipment for Microelectronic Production. *Academician of National Academy of Sciences of the Republic of Belarus*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 283 (in Russian).
9. Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Gorushko V. A., Omelchenko A. A. (2018) Solid-State Recrystallization of Mechanically Disrupted Layer of Silicon at Fast Thermal Treatment. *Scholarly Papers of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus*. 62 (3), 347–352 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Пилипенко В. А., чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, д. т. н., профессор, заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикроанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Омельченко А. А., вед. инж. государственного центра «Белмикроанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121а
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 29 999-30-21
E-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru
Омельченко Анна Александровна

Information about the authors

Pilipenko U. A., Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Deputy Director for Scientific Development at the State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company

Amelchanka H. A., Senior Engineer at the State Center “Belmicroanalysis, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121a
JSC “INTEGRAL” –
“INTEGRAL” Holding Managing Company
Tel.: +375 29 999-30-21
E-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru
Amelchanka Hanna Alyaksandrayna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-33-39>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.89:621.793

ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Н. В. ЛЕОНОВИЧ, П. Д. ТОВТ, Д. А. КОТОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 27.04.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. В статье представлен разработанный технологический реактор для формирования алмазоподобного углеродного покрытия на подложках диаметром до 200 мм методом химического осаждения из газовой фазы в индуктивно-связанной плазме высокой плотности при рабочем давлении менее 5 Па. Приведены результаты экспериментальных исследований по получению алмазоподобного углеродного покрытия в данном реакторе. Установлены зависимости скорости осаждения углеродного покрытия от мощности ВЧ-разряда, рабочего давления и расхода пленкообразующего газообразного реагента. Рассмотрены режимы получения алмазоподобных углеродных покрытий с наилучшими механическими свойствами при следующих параметрах процесса: ВЧ-мощность – 600–900 Вт, расход газа прекурсора – 15–50 см³/мин, соотношение объемов плазмообразующего и пленкообразующего газов – 3:1 при остаточном давлении в рабочей камере не более 4 Па. С помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния показано, что в покрытиях, полученных при эффективных режимах, в значительном количестве содержится алмазоподобная фаза.

Ключевые слова: алмазоподобное углеродное покрытие, плазма высокой плотности, индуктивно-связанная плазма, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Леонович, Н. В. Формирование алмазоподобных углеродных покрытий методом химического осаждения в плазме высокой плотности / Н. В. Леонович, П. Д. Товт, Д. А. Котов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 33–39. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-33-39>.

FORMATION OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS BY CHEMICAL DEPOSITION IN HIGH DENSITY PLASMA

NIKITA V. LEONOVICH, PAVEL D. TOVT, DMITRY A. KOTOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27.04.2023

Abstract. A developed technological reactor for the formation of a diamond-like carbon coating on substrates up to 200 mm in diameter by chemical vapor deposition in high-density inductively coupled plasma at an operating pressure below 5 Pa is described. The results of experimental studies on obtaining a diamond-like carbon coating

in the developed reactor are presented. The dependences of the rate of deposition of a diamond-like carbon coating on the power of the RF discharge, the operating pressure, and the consumption of the film-forming gaseous reagent have been established. Also, for the developed technological reactor, the modes for obtaining diamond-like carbon coatings with the best mechanical properties were established with the following process parameters: RF power 600–900 W, precursor gas flow rate 15–50 cm³/min, the ratio of plasma-forming gas volumes to film-forming gas volume 3:1 at a residual pressure in the working chamber of not more than 4 Pa. It has been shown by Raman spectroscopy that the coatings obtained under efficient conditions contain a significant amount of a diamond-like phase.

Keywords: diamond-like carbon coating, high-density plasma, inductively coupled plasma, Raman spectroscopy.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Leonovich N. V., Tovt P. D., Kotov D. A. (2023) Formation of Diamond-Like Carbon Coatings by Chemical Deposition in High Density Plasma. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 33–39. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-33-39> (in Russian).

Введение

Алмазоподобное углеродное (АПУ) покрытие является одним из востребованных оптических покрытий благодаря уникальным свойствам – высокому пропусканию в инфракрасной области спектра (используемой для защиты и просветления германиевой оптики в интервале 8–14 мкм), высокой теплопроводности и электрическому сопротивлению, сопротивлению к истиранию и стойкости к кислотам, щелочам, солям, что важно для приборов ночного видения, мобильных транспортных средств передвижения и т. п. Использование алмазоподобных углеродных покрытий в оптике обусловлено прозрачностью в видимом и инфракрасном диапазонах и высокими защитными свойствами для оптических элементов от воздействия таких внешних факторов, как влага и мелкодисперсная пыль (песок). Эти свойства АПУ определены наличием в покрытии sp³- и sp²-гибридизированных связей углерода. У покрытий с высоким содержанием sp³ (алмазных) связей увеличиваются коэффициент пропускания света, механическая твердость, износостойкость, а при высоком содержании sp² (графитовых) связей растет коэффициент экстинкции, т. е. поглощение [1, 2].

АПУ-покрытия получают физическими и химическими методами осаждения, имеющими свои преимущества и недостатки [3]. В последние десятилетия для получения оптических АПУ-покрытий используют метод химического осаждения из газовой фазы в плазме высокой плотности [3]. Основные преимущества этого метода осаждения по сравнению с другими – хорошая адгезия пленок к нижележащим слоям, низкая температура процесса (25–300 °С), высокая плотность ионизированных частиц в плазме (порядка 10¹² см⁻³), широкий спектр химических реакций и источников для реакций с благоприятными термодинамикой и кинетикой [4]. Процесс химического осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы осуществляется в диапазоне давлений от 0,05 до 10,00 Па, причем, чем меньше рабочее давление, тем равномернее распределение реагента, и соответственно, лучше равномерность формируемого покрытия по толщине. Высокая концентрация заряженных частиц и радикалов газообразного реагента имеет определяющее влияние и на структуру, и на физические свойства осаждаемого покрытия. Следовательно, управляя режимами процесса осаждения, можно задавать структуру формируемого АПУ-покрытия с заданными оптическими характеристиками и защитными свойствами.

Экспериментальный комплекс

Для проведения процессов химического осаждения применяют специальные реакторы, в которых создаются условия высокой равномерности распределения газообразного реагента над поверхностью подложки. При использовании плазмы высокой плотности критичным является равномерность ее генерации над всей поверхностью подложки, что обеспечивается как газораспределением, так и внешним магнитным полем. С учетом этого авторами разработан цилиндрический реактор плазмохимического осаждения алмазоподобных углеродных покрытий внутренним диаметром 280 мм, схематическое изображение которого представлено на рис. 1. Габаритные размеры реактора выбирались таким образом, чтобы проводить осаждение покрытий на подложках диаметром до 200 мм с неравномерностью не менее ±10 %.

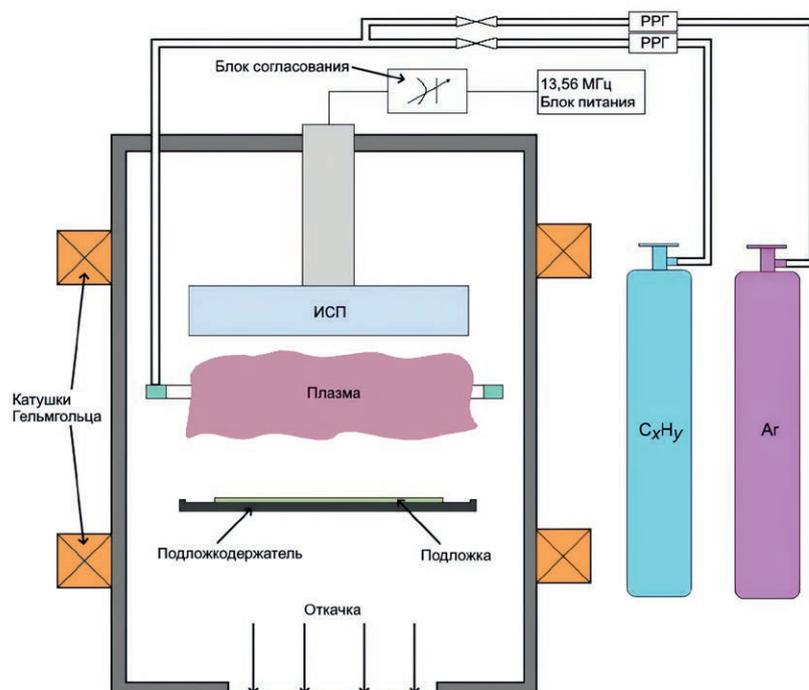


Рис. 1. Схематическое изображение установки осаждения алмазоподобного углеродного покрытия в плазме высокой плотности

Fig. 1. Schematic representation of the installation for the deposition of a diamond-like carbon coating in a high-density plasma

Реактор оснащен соосно расположенным плоским генератором плазмы высокой плотности индукционного типа, работающего на частоте 13,56 МГц, блоками питания и согласования ВЧ-мощности, кольцевым газораспределителем лабиринтного типа, охлаждаемым подложкодержателем с возможностью подачи ВЧ-смещения и двумя внешними соленоидами для создания катушки Гельмгольца. Соленоиды расположены таким образом, что область между ними с равномерным аксиальным магнитным полем в диапазоне от 0,1 до 10,0 мТл приходилась на зону над поверхностью подложки в камере реактора. Газораспределитель установлен с возможностью перемещения соосно с источником плазмы на расстоянии до 150 мм для отработки различных конфигураций процесса осаждения. Плазма в реакторе генерируется в области под источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП), из которой она диффузно в аксиальном магнитном поле распространяется в область над подложкодержателем. Поток смеси рабочих газов – аргона и ацетилена – задается через два регулятора расхода газа РРГ-12. Откачка осуществляется пластинчато-роторным VRD-48 и турбомолекулярным Edwards STP-iXR 1606 насосами. Питание источника плазмы и смещения на подложкодержатель осуществляется с применением блоков согласования IZOVAC AMIL-3000, AMCL-3000 и ВЧ-генераторов GL-13.2 и GL-13.1 соответственно. Блоки питания соленоидов – НУ302.

Для работы источника ИСП на давлениях, менее одного паскаля, в реакторе необходимо создавать аксиальное магнитное поле, наличие которого позволяет увеличить плотность плазмы и тем самым способствовать ее поддержанию при пониженном давлении [5]. Это также снижает температурное воздействие на подложку. Оба эти фактора позволили реализовать процесс осаждения покрытия при температуре до 100 °С и давлении менее 5 Па.

Результаты эксперимента

С целью определения возможностей разработанного оборудования и эффективных режимов процесса осаждения алмазоподобных углеродных покрытий проведены исследования изменения скорости роста формируемого слоя от мощности разряда, а также состава рабочей смеси газов и давления в реакторе. Установленные зависимости представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 показаны изменения скорости формирования покрытия при разных расходах ацетилена в зависимости от мощности ВЧ-разряда.

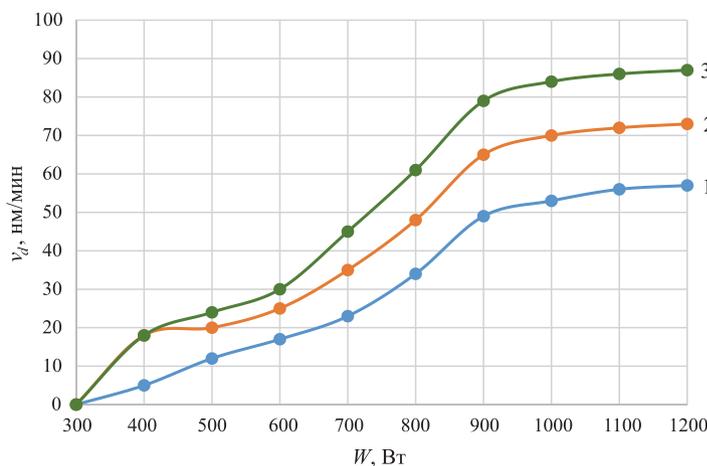


Рис. 2. Зависимость скорости роста алмазоподобных углеродных покрытий на кремниевой подложке в высокоплотной плазме индукционного разряда от величины подводимой ВЧ-мощности при постоянном расходе аргона 150 см³/мин и различном расходе ацетилена, см³/мин: 1 – 50; 2 – 80; 3 – 120
Fig. 2. Dependence of the growth rate of diamond-like carbon coatings on a silicon substrate in a high-density plasma of an induction discharge on the value of the supplied RF power at a constant argon flow rate of 150 cm³/min and at various acetylene flow rates, cm³/min: 1 – 50; 2 – 80; 3 – 120

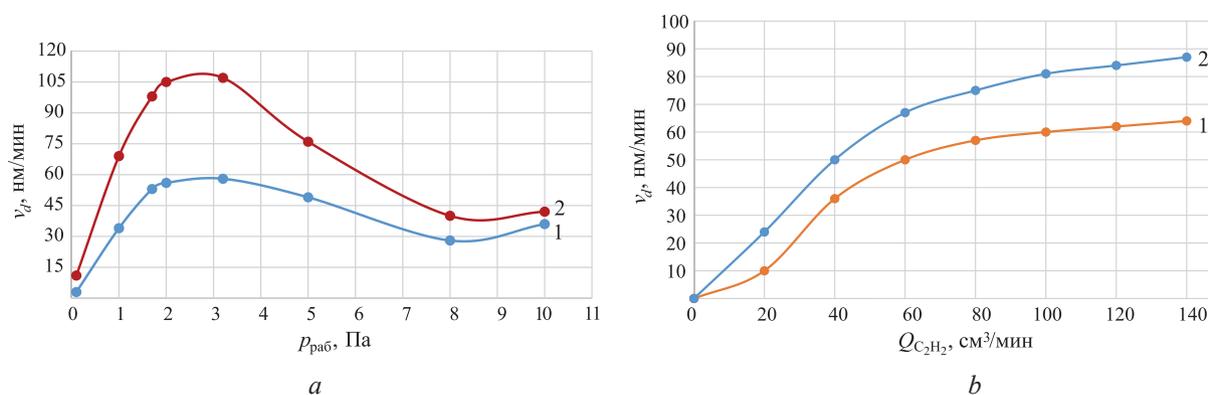


Рис. 3. Зависимость скорости роста алмазоподобных углеродных покрытий на кремниевой подложке (при расходе аргона 250 см³/мин) в высокоплотной плазме индукционного разряда: *a* – от рабочего давления газовой смеси при отношении расхода аргона к ацетилену: 1 – 6:1, 2 – 3:1; *b* – от изменения соотношения компонентов газовой смеси при мощностях: 1 – 600 Вт, 2 – 900 Вт
Fig. 3. Dependence of the growth rate of diamond-like carbon coatings on a silicon substrate (at argon flow rate of 250 cm³/min) in a high-density plasma of an inductive discharge: *a* – on the working pressure of the gas mixture at different ratios of argon to acetylene volumes: 1 – 6:1, 2 – 3:1; *b* – on the ratio of the gas mixture components at different powers: 1 – 600 W, 2 – 900 W

Мощность плазменного разряда определяет эффективность генерации активных частиц, а это, в свою очередь, способствует увеличению эффективности использования реактивного вещества. Как видно из рис. 2, при увеличении ВЧ-мощности индукционного разряда от 300 до 900 Вт скорость осаждения АПУ-покрытий увеличивается при различном расходе ацетилена. Это свидетельствует о повышении интенсивности ионизации плазмообразующих газов и эффективности распада ацетилена. При мощности разряда более 900 Вт достигается режим насыщения, что говорит о распаде на активные химические радикалы практически всего поступающего газа-прекурсора. В связи с этим скорость осаждения с повышением ВЧ-мощности индукционного разряда практически перестает заметно увеличиваться.

На рис. 3, *a* представлены зависимости изменения скорости формирования АПУ-покрытия при различных соотношениях аргона к ацетилену и изменениях их расхода, что приводит к изменению рабочего давления при постоянной мощности ВЧ-разряда. Для формирования алмазоподобных углеродных покрытий рабочее давление газовой смеси в реакционной камере варьировалось от 0,1 до 10,0 Па. При этом отношение расхода аргона к ацетилену составляло 6:1 и 3:1

при мощности ВЧ-разряда 900 Вт и температуре подложкодержателя 373 К. С увеличением рабочего давления смеси $C_2H_2 + Ar$ в условиях постоянного соотношения расходов аргона и ацетилена, как 6:1, так 3:1, наблюдается сначала увеличение скорости осаждения АПУ-покрытий, затем – ее уменьшение. Первоначальное повышение скорости роста связано с увеличением плотности активных радикалов у поверхности подложки и, как следствие, с увеличением скорости доставки их к ее поверхности. Высокая скорость роста при рабочем давлении 1,5–4,0 Па в реакционной камере свидетельствует в пользу того, что происходит стабильная транспортировка химически активных углеродосодержащих радикалов на поверхность кремниевой подложки. И, вероятно, трансформация химически активных ионизированных радикалов ацетилена в углерод в конденсированном состоянии на поверхности подложки в этом случае увеличивается. Повышение же общего давления газовой смеси в реакционной камере более 4,0–5,0 Па ведет к сокращению длины свободного пробега радикалов пленкообразующего вещества, что дает уменьшение скорости роста покрытия. Это усиливает их рассеяние и в результате приводит к уменьшению скорости роста алмазоподобных углеродных покрытий.

Зависимости на рис. 3, *b* показывают изменение скорости осаждения АПУ-покрытия при изменении расхода C_2H_2 для двух вариантов мощности ВЧ-разряда. Наблюдение за изменением скорости роста АПУ-покрытий при постоянном расходе аргона 250 мл/мин и постоянной ВЧ-мощности показывает, что скорость роста АПУ-покрытий увеличивается во всем исследуемом диапазоне расхода ацетилена от 33 до 150 см³/мин. По сути, в этом случае изменение скорости роста коррелирует с увеличением атомов углерода в реакционном пространстве. Увеличение расхода ацетилена от 20 до 100 см³/мин приводит к интенсивному росту скорости осаждения алмазоподобного углеродного покрытия при ВЧ-мощности 600 и 900 Вт. Тем не менее следует отметить, что пленки, полученные при высокой скорости осаждения, легко удаляются стиранием. Это говорит об их низкой плотности из-за присутствия большого объема аморфной фазы. В то же время пленки, получаемые при скоростях формирования до 30 нм/мин, показывали гораздо более высокую устойчивость к истиранию, что явно указывает на присутствие sp^3 -алмазной фазы. В результате проведенных исследований установлены эффективные режимы получения АПУ-покрытий с позиции скорости их формирования и косвенной оценки наличия аморфной и алмазной фаз.

Спектроскопия комбинационного рассеяния

Для определения количественного соотношения sp^2 - и sp^3 -связей использовали метод спектроскопии комбинационного рассеяния. К его достоинствам можно отнести хорошую чувствительность к высокосимметричным ковалентным связям с маленьким или отсутствующим дипольными моментами. Углерод-углеродные связи полностью соответствуют этому критерию. Исследования проводились на измерительном комплексе производства компании SOL instruments Ltd. на основе оптического блока NR500 и конфокального микроскопа Nikon Eclipse Ti. Возбуждение осуществлялось полупроводниковым лазером с длиной волны 473 нм. На рис. 4 представлен характерный спектр комбинационного рассеяния, полученный при исследовании образцов с АПУ-покрытиями.

Как видно из рис. 4, на спектре выделяются два основных пика – *G*-полосы и *D*-полосы, характерные для структуры углеродных материалов [6]. Так, пик *G*-полосы обычно соответствует волновому числу 1582 см⁻¹ и характеризует структурную sp^2 -фазу графена, пик *D*-полосы – волновому числу 1350 см⁻¹ и отображает степень структурной неупорядоченности – дефектность микрокристаллической структуры. Отношение интенсивностей Рамановских пиков двух полос I_D/I_G используется для вычисления степени неупорядоченности углеродного материала [6]. Спектр демонстрирует высокую полуширину полосы *D*, что указывает на низкую степень графитизации [6], в то время как полоса *T* на 977 см⁻¹ говорит о присутствии небольшого количества аморфного углерода. Подложкой для алмазоподобных углеродных пленок являлся кремний Si, поэтому его пик расположен на длине волны 517 см⁻¹. Без использования смещения получены АПУ-покрытия, которые действительно содержат sp^3 -алмазную фазу [3]. По предварительной оценке Рамановских спектров полученных образцов АПУ-покрытий, процентное содержание этой фазы в покрытиях превышает значение 30.

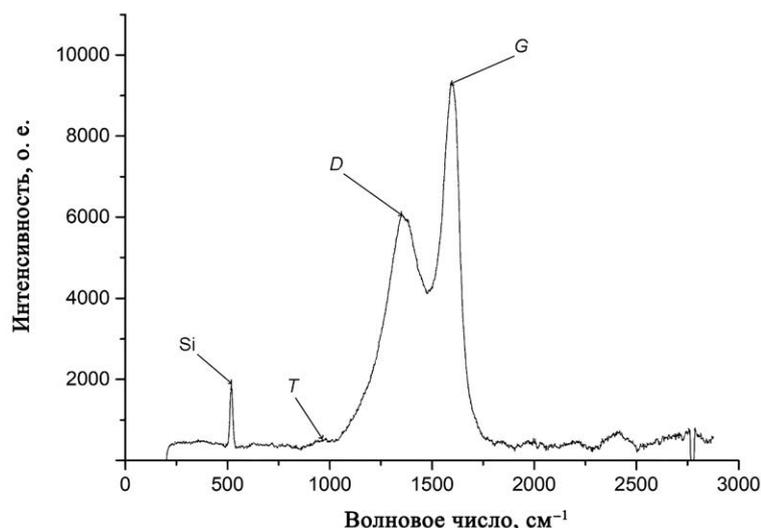


Рис. 4. Характерный Рамановский спектр полученного алмазоподобного углеродного покрытия
Fig. 4. Characteristic Raman spectrum of the obtained diamond-like carbon coating

Заключение

1. На основе плоского источника индуктивно-связанной плазмы разработан реактор для химического осаждения алмазоподобных углеродных покрытий из газовой фазы с возможностью формирования аксиального магнитного поля в рабочей камере, что позволило реализовать данный процесс осаждения на давлениях менее 1 Па.

2. В результате проведенных исследований установлены режимы получения алмазоподобных углеродных покрытий с наилучшими механическими свойствами при следующих технологических параметрах процесса: ВЧ-мощность – 600–900 Вт, расход газа прекурсора – 15–50 см³/мин при остаточном давлении в рабочей камере не более 4 Па. С увеличением расхода ацетилена скорость осаждения покрытия увеличивалась вплоть до 100 нм/мин, но при этом существенно ухудшались его механические свойства, что говорит о превалировании в них аморфной фазы.

3. Без использования ВЧ-смещения получены алмазоподобные углеродные покрытия, которые по оценке методом Рамановской спектроскопии содержат sp³-фазу, процентное содержание которой в покрытиях превышает значение 30.

Список литературы

1. Diamon-Like Carbon Coating Made by RF Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition for Protective Antireflective Coatings on Germanium / V. Ashish [et al.] // *Procedia Materials Science*. 2014. No 5. P. 1015–1019.
2. Упрочнение алмазоподобных углеродных покрытий для оптических материалов / Ю. Миронов [и др.] // Российско-израильский двусторонний семинар. 2014. Вып. 2. С. 52–59.
3. Робертсон, Дж. Алмазоподобный аморфный углерод / Дж. Робертсон // *Материаловедение и инженерия*. 2002. Т. 37. С. 129–281. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
4. Effect of the RF Bias on the Plasma Density in an Argon Inductively Coupled Plasma / H.-W. Lee [et al.] // *Physics of Plasmas*. No 27. 093508 p. <https://doi.org/10.1063/5.0015555>.
5. Ясюнас, А. А. Влияние распределения магнитного поля на разрядные параметры источника индукционного разряда / А. А. Ясюнас, Д. А. Котов // «Молодежь в науке – 2014», приложение к журналу «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі», в 5 ч. Минск, 2015. Ч. 3. Серия физико-технических наук. С. 49–53.
6. Raman Microspectroscopy of Soot and Related Carbonaceous Materials: Spectral Analysis and Structural Information / A. Sadezky [et al.] // *Carbon*. 2005. No 43. P. 1731–1742.

References

1. Ashish V., Ankit K., Niranjana Reddy K., Chellamalai M., Shashikumar P. V. (2014) Diamon-Like Carbon Coating Made by RF Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition for Protective Antireflective Coatings on Germanium. *Procedia Materials Science*. (5), 1015–1019.

2. Mironov Y., Stepanov R., Osipkov A., Belyaeva A., Makeev M. (2014) Strengthening Diamond Like Carbon Coatings for Optic Materials. *Russian – Israeli Bi-National Workshop*. (2), 52–59 (in Russian).
3. Robertson J. (2002) Diamond-Like Amorphous Carbon. *Materials Science and Engineering*. 37, 129–281. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0 (in Russian).
4. Lee H.-W., Kim K.-H., Seo J.-I., Chung C.-W. (2020) Effect of the RF Bias on the Plasma Density in an Argon Inductively Coupled Plasma. *Physics of Plasmas*. (27), 093508.
5. Yasyunas A. A., Kotov D. A. (2015) The Influence of the Distribution of the Magnetic Field on the Discharge Parameters of the Source of the Induction Discharge. *Youth in Science – Supplement to the Journal “News of the National Academy of Sciences of Belarus”, at 5 Part*. Minsk, Part 3. Series of Physical and Technical Sciences. 49–53 (in Russian).
6. Sadezky A., Muckenhuber H., Grothe H., Niessner R., Pöschl U. (2005) Raman Microspectroscopy of Soot and Related Carbonaceous Materials: Spectral Analysis and Structural Information. *Carbon*. (43), 1731–1742.

Вклад авторов

Леонович Н. В. изготовил образцы и выполнил первичный анализ полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Товт П. Д. оформил графический и текстовый материал.

Котов Д. А. осуществил постановку задачи и анализ полученных данных.

Authors' contribution

Leonovich N. V. performed sample preparation and the primary analysis of the results, prepared the manuscript of the article.

Tovt P. D. performed graphic and text material.

Kotov D. A. carried out the formulation of the problem and analysis for the date obtained.

Сведения об авторах

Леонович Н. В., мл. н. с. центра междисциплинарных исследований научно-исследовательской части (НИЧ) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Товт П. Д., инженер-электроник центра междисциплинарных исследований НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Котов Д. А., к. т. н., доцент кафедры микро- и наноэлектроники, заместитель начальника центра междисциплинарных исследований НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-04
E-mail: n.leonovich@bsuir.by
Леонович Никита Викторович

Information about the authors

Leonovich N. V., Junior Researcher at the Center for Interdisciplinary Research of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tovt P. D., Electronics Engineer at the Center for Interdisciplinary Research of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kotov D. A., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Deputy Chief of the Center for Interdisciplinary Research of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-04
E-mail: n.leonovich@bsuir.by
Leonovich Nikita Victorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-40-45>

Original paper

UDC 621.373.826

ESTIMATING THE PARAMETERS OF LASER PROCESSING OF DIAMONDS USING THE FINITE ELEMENT METHOD AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

VICTOR A. EMELYANOV¹, EVGENY B. SHERSHNEV², YURI V. NIKITJUK²,
SERGEY I. SOKOLOV², IGOR Y. AUSHEV³

¹Joint-Stock Company "INTEGRAL" – Manager Holding Company "INTEGRAL"
(Minsk, Republic of Belarus)

²Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus)

³University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 13.02.2023

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

Abstract. This paper provides the simulation of laser processing of diamonds by using a combination of artificial neural networks and the finite element method. The training data array and the data array for testing neural networks were generated in ANSYS. The calculations were performed for 600 types of input parameters, 60 of which were used to test artificial neural networks. The influence of the parameters of neural network models on the accuracy of determining temperatures in the laser processing area were studied. The parameters of neural networks were established that provide acceptable results in predicting temperatures generated by laser radiation in diamonds. The results obtained can be used to determine the technological parameters of the laser processing of diamonds.

Keywords: neural network, laser processing, diamond, ANSYS.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. (2023) Estimating the Parameters of Laser Processing of Diamonds Using the Finite Element Method and Artificial Neural Networks. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 40–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-40-45>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, Е. Б. ШЕРШНЕВ², Ю. В. НИКИТЮК²,
С. И. СОКОЛОВ², И. Ю. АУШЕВ³

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (г. Гомель, Республика Беларусь)

³Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 13.02.2023

Аннотация. С помощью сочетания искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов выполнено моделирование процесса лазерной обработки алмазов. Обучающий массив данных и массив данных для тестирования нейронных сетей были сформированы с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS. Расчеты выполняли для 600 вариантов входных параметров, 60 из которых использовали для тестирования искусственных нейронных сетей. Исследовано влияние параметров нейросетевых моделей на точность определения температур в зоне лазерной обработки. Установлены параметры ней-

ронных сетей, обеспечивающие приемлемые результаты при прогнозировании температур, формируемых лазерным излучением в алмазах. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов лазерной обработки алмазов.

Ключевые слова: нейронная сеть, лазерная обработка, алмаз, ANSYS.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Определение параметров лазерной обработки алмазов с применением метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей / В. А. Емельянов [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 40–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-40-45>.

Introduction

The properties of diamond ensure the reliable operation of diamond-based devices under critical conditions and make it promising to use diamonds in developing new technology [1]. Laser processing of diamond has a number of advantages which include the possibility of forming narrow cuts, high productivity of the laser dimensional processing, and the possibility of automating the process of diamond cutting using laser radiation [2, 3].

At present, ANSYS is widely used to calculate the temperature fields during laser processing of materials, including diamonds [4–9]. Artificial neural networks are also effectively used to study laser processing of materials [5, 10–12]. In some cases, a combination of artificial neural networks and the finite element method is applied when simulating laser processing [13–18]. This research aims to predict the temperature fields during laser processing of diamonds via the finite element method and artificial neural networks.

Finite element analysis

The training data array and the array data for testing neural networks were generated as a result of finite element calculations with ANSYS of temperature fields during laser processing of diamonds. A model consisting of 45418 Solid 87 elements was used during the simulation process [19]. The properties of diamonds presented in [2, 20] were used for calculations. The calculations were performed for a sample with the shape of a rectangular parallelepiped with geometric dimensions of $2 \times 3 \times 1.5$ mm, while the temperatures were determined on its surface in the center of a circular laser beam, as well as at a depth of 0.00002 and 0.00004 m.

The parameters used for finite element simulation of two-beam laser cleaning of quartz raw materials are presented in Tab. 1. Fig. 1 shows the distribution of temperature fields during laser processing of diamond. Calculations were performed for 600 types of input parameters, 100 of which were used to test neural networks (Tab. 2).

Table 1. Parameters of laser action on diamond

Parameter	Value range
Processing speed v , m/s	0.001–0.010
Laser beam radius R , m	0.00005–0.00007
Laser power density P_0 , 10^{10} W/m ²	1–5

Fig. 1. Temperature distribution in the volume of diamond to be processed, K ($v = 1$ mm/s, $R = 5$ mm, $P_0 = 10^{10}$ W/m²)

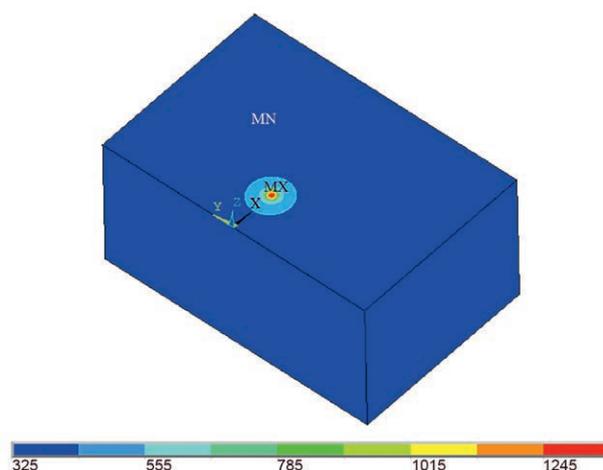


Table 2. Test dataset

No	v , m/s	R , m	P_0 , W/m ²	T_1 , K	T_2 , K	T_3 , K
1	0.00584	0.00006	16600000000	2411	1774	1374
2	0.00669	0.00006	29600000000	4067	2931	2218
3	0.00791	0.00007	40200000000	6302	4713	3641
4	0.00639	0.00005	10200000000	1361	986	775
5	0.00309	0.00006	24300000000	3408	2475	1890
6	0.00116	0.00007	46700000000	7445	5599	4353
7	0.00462	0.00005	47800000000	5305	3548	2558
8	0.00144	0.00007	10900000000	1953	1523	1232
9	0.00494	0.00006	15000000000	2209	1633	1272
10	0.00104	0.00007	13300000000	2336	1811	1456
11	0.00786	0.00007	39000000000	6123	4582	3541
12	0.00521	0.00005	25500000000	2965	2028	1500
13	0.00852	0.00006	40500000000	5450	3896	2920
14	0.00608	0.00007	11600000000	2030	1571	1262
15	0.00230	0.00007	24500000000	3995	3026	2373
16	0.00174	0.00005	44600000000	5009	3369	2446
17	0.00701	0.00007	14600000000	2477	1900	1511
18	0.00339	0.00006	23300000000	3277	2383	1822
19	0.00851	0.00006	26100000000	3617	2615	1986
20	0.00414	0.00005	16400000000	2014	1411	1071
21	0.00797	0.00006	31600000000	4318	3105	2344
22	0.00207	0.00007	41200000000	6528	4899	3800
23	0.00761	0.00005	36700000000	4132	2783	2023
24	0.00140	0.00006	48600000000	6590	4724	3554
25	0.00999	0.00005	17400000000	2111	1471	1111
26	0.00513	0.00005	39900000000	4475	3008	2182
27	0.00899	0.00007	30000000000	4774	3588	2788
28	0.00201	0.00007	37400000000	5955	4477	3479
29	0.00612	0.00007	17700000000	2943	2244	1772
30	0.00981	0.00006	28900000000	3970	2861	2165
31	0.00188	0.00007	22200000000	3658	2780	2188
32	0.00939	0.00005	29100000000	3334	2264	1662
33	0.00485	0.00006	36300000000	4930	3537	2663
34	0.00510	0.00005	41800000000	4674	3137	2272
35	0.00632	0.00006	37600000000	5089	3646	2740
36	0.00566	0.00005	49500000000	5478	3659	2633
37	0.00402	0.00005	34000000000	3861	2611	1907
38	0.00401	0.00007	38900000000	6135	4598	3560
39	0.00941	0.00006	10500000000	1629	1226	973
40	0.00765	0.00006	37100000000	5020	3596	2702
41	0.00108	0.00005	49700000000	5591	3763	2734
42	0.00350	0.00007	12900000000	2233	1723	1379
43	0.00867	0.00006	44400000000	5946	4242	3173
44	0.00945	0.00007	45900000000	7146	5332	4107
45	0.00839	0.00005	17800000000	2154	1500	1131
46	0.00261	0.00006	19900000000	2848	2084	1605
47	0.00327	0.00007	48700000000	7621	5696	4397
48	0.00996	0.00005	40200000000	4493	3015	2182
49	0.00146	0.00006	39400000000	5394	3881	2932
50	0.00345	0.00005	21900000000	2594	1788	1335
51	0.00905	0.00006	32000000000	4366	3138	2367
52	0.00674	0.00006	30600000000	4195	3020	2283
53	0.00660	0.00006	42600000000	5725	4090	3064
54	0.00497	0.00005	38700000000	4350	2927	2125
55	0.00888	0.00007	34400000000	5431	4072	3154
56	0.00599	0.00007	45600000000	7122	5319	4103
57	0.00483	0.00007	24000000000	3892	2944	2304
58	0.00431	0.00007	15600000000	2635	2018	1602
59	0.00845	0.00006	26000000000	3604	2606	1980
60	0.00846	0.00005	19500000000	2332	1615	1211

Neural network application

The key feature of artificial neural networks is that they are trained, not programmed. At the same time, neural networks are effective in simulating complex associations between input and output parameters [21]. As mentioned earlier, the training data array and the array data for testing neural networks were generated as a result of solving the corresponding problems in ANSYS. After training, the artificial neural network, dealing with new sets of laser processing parameters, can determine accurately the maximum temperatures at different depths in diamond crystals.

Feedforward neural networks created in TensorFlow were provided to determine the temperature value during laser processing [22]. While generating networks, the Adam optimizer, the MSE loss function, and ReLu activation function were used. The number of epochs for training networks was 100. Neural networks with the architecture shown in Fig. 2 were used to determine the temperature values during laser processing.

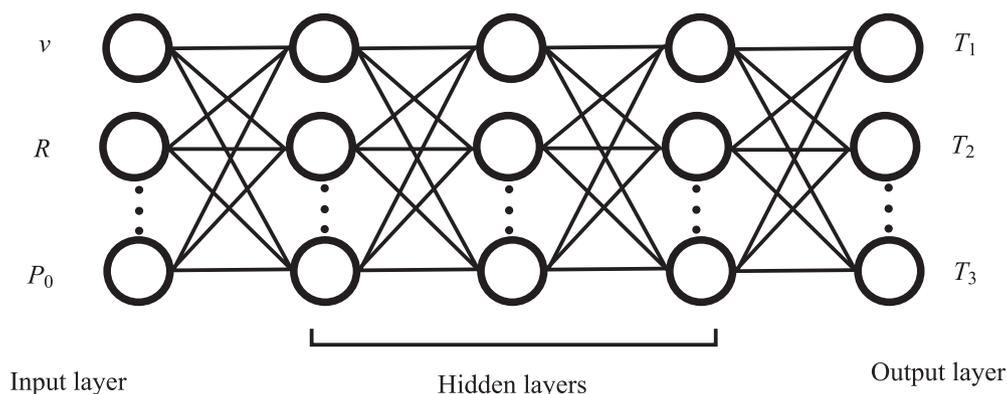


Fig. 2. Neural network architecture

To assess the efficiency of neural networks, the following criteria were used:

– coefficient of determination

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}; \quad (1)$$

– mean absolute error

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|; \quad (2)$$

– root mean square error

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}; \quad (3)$$

– mean absolute percentage error

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| 100, \quad (4)$$

where d_i is the desired network output; y_i is the actual network output.

The outcomes of the resulting neural networks are provided in Tab. 3.

Table 3. Neural network testing outcomes

No		Network architecture	RMSE	MAE	MAPE	R^2
1	a	[3-5-3]	38.0	27.1	1.0	0.9989
	b		35.9	26.5	0.9	0.9991
2	a	[3-10-3]	15.8	11.4	0.4	0.9998
	b		14.7	10.6	0.3	0.9998

Ending of Tab. 3

No		Network architecture	RMSE	MAE	MAPE	R^2
3	a	[3-15-3]	22.4	17.8	0.7	0.9996
	b		21.7	16.7	0.6	0.9996
4	a	[3-5-5-3]	23.4	16.8	0.7	0.9995
	b		19.1	14.5	0.6	0.9997
5	a	[3-10-5-3]	34.9	28.0	1.0	0.9991
	b		31.3	24.9	0.9	0.9993
6	a	[3-5-10-3]	11.7	8.7	0.3	0.9998
	b		10.4	7.9	0.3	0.9999
7	a	[3-10-10-3]	10.2	7.9	0.3	0.9999
	b		9.7	7.6	0.3	0.9999
8	a	[3-10-15-3]	21.8	15.8	0.6	0.9996
	b		17.7	13.3	0.6	0.9997
9	a	[3-15-10-3]	9.1	6.6	0.2	0.9999
	b		7.3	5.4	0.2	0.9999
10	a	[3-15-15-3]	17.3	13.4	0.6	0.9997
	b		15.5	8.7	0.5	0.9998

In testing, the best results were obtained for option 9 of the neural network configuration with two hidden layers. MAPE did not exceed 0.2 %, and MAE and RMSE did not exceed 10 K.

Conclusion

The current paper shows the possibility of predicting the modes of laser processing of diamonds using a combination of the finite element method and artificial neural networks. Based on numerical experiments, the neural network architecture has been established, which ensures a better outcome when determining the temperature values in the laser action area. The results can be used to determine the technological parameters of laser processing of diamonds.

References

1. Mityagin A. Y., Altukhov A. A., Mityagina A. B. (2009) Technology and Equipment for Processing Diamond Materials of Modern Technology. *Technology and Design in Electronic Equipment*. (1), 53–58 (in Russian).
2. Shkadov A. I., Bocharov A. M. (ed.) (1997) Physical Foundations of Laser Processing of Diamonds. *Physical Bases of Laser Diamond Processing*. 3, 288 (in Russian).
3. Retukhin G. E., Koshcheev A. G., Fain I. V., Shershnev E. B. (2001) Dimensional Processing of Gem Diamonds by Q-Switched YAG: ND Laser Radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. (1), 73–77 (in Russian).
4. Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D. (2014) Optimization of Laser Microprocessing Modes. *Avtometriya*. 50 (6), 3–21 (in Russian).
5. Parandoush P., Hossain A. (2014) A Review of Modeling and Simulation of Laser Beam Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. (85), 135–145.
6. Shalupaev S. V., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sviridova V. V. (2001) Dependence of the Diamond Laser Processing Efficiency on Crystallographic Directions. *SPIE*. 4358, 329–333.
7. Shershnev E. B., Nikityuk Y. V., Shershnev A. E. (2011) Simulation of Laser Processing of Diamond Crystals. *Proceedings of Francisk Skorina Gomel State University*. (6), 164–168 (in Russian).
8. Shershnev E. B., Nikityuk Y. V., Shershnev A. E., Sokolov S. I. (2015) Features of the Formation of Thermoelastic Fields During Laser Processing of Diamond Crystals. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. (1), 38–40 (in Russian).
9. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Laser Processing of Diamonds. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. (4), 30–36.
10. Bakhtiyari A. N., Wang Z., Wang L., Zheng H. (2021) A Review on Applications of Artificial Intelligence in Modeling and Optimization of Laser Beam Machining. *Optics & Laser Technology*. 135, 1–18.
11. Yousef B. F., Knopf G. K., Bordatchev E. V., Nikumb S. K. (2003) Neural Network Modeling and Analysis of the Material Removal Process During Laser Machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 22 (1–2), 41–53.
12. Ismail M., Okamoto Y., Okado A. (2013) Neural Network Modeling for Prediction of Weld Bead Geometry in Laser Microwelding. *Advances in Optical Technologies*. 7.

13. Kadri M. B., Nisar S., Khan S. Z., Khan W. A. (2015) Comparison of ANN and Finite Element Model for the Prediction of Thermal Stresses in Diode Laser Cutting of Float Glass. *Optik – Int. J. Light Electron Optics*. 126 (19), 1959–1964.
14. Kant R., Joshi S. N., Dixit U. S. (2015) An Integrated FEM-ANN Model for Laser Bending Process with Inverse Estimation of Absorptivity. *Mech Adv Mater Mod Process*. (1), 6.
15. Nikitjuk Y., Bayevich G., Myshkovets V., Maximenko A., Aushev I. (2022). Characterization of Laser Welding of Steel 30XГЧ2А by Combining Artificial Neural Networks and Finite Element Method. *Research and Education: Traditions and Innovations. INTER-ACADEMIA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 422. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0379-3_28.
16. Nikityuk Y. V., Serdyukov A. N., Prokhorenko V. A., Aushev I. Y. (2021) Application of Artificial Neural Networks and the Finite Element Method to Determine the Processing Parameters of Quartz Sol-Gel Glasses with Elliptical Laser Beams. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. (3), 30–36 (in Russian).
17. Nikitjuk Y. V., Serdyukov A. N., Aushev I. Y. (2022) Determination of the Parameters of Two-Beam Laser Splitting of Silicate Glasses Using Regression and Neural Network Models. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 5–43.
18. Nikityuk Y. V. et al. (2022) Application of the Finite Element Method and Artificial Neural Networks to Determine the Parameters of Laser Processing of Steel 12X18H9T. *Bulletin. Sukhoi State Technical University of Gomel*. (1), 48–55 (in Russian).
19. Bokii G. B., Bezrukov G. N., Klyuev Y. A. et al. (1986) *Natural and Synthetic Diamonds*. Moscow, Nauka Publ. 221 (in Russian).
20. Novikov N. V. et al. (1987) *Physical Properties of Diamond*. Kiev, Navukova Dumka Publ. 201 (in Russian).
21. Golovko V. A., Krasnoproshin V. V. (2017) *Neural Network Technologies for Data Processing: Teaching Manual*. Minsk, BSU Publ. 263 (in Russian).
22. François Chollet (2018) *Deep Learning with Python*. St. Petersburg, Peter Publ. 400.

Authors' contribution

Emelyanov V. A. and Shershnev E. B. developed a model of laser processing of diamonds.

Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I. and Aushev I. Y. carried out a numerical experiment using a model of laser processing of diamonds and performed the optimization of the corresponding parameters.

Information about the authors

Emelyanov V. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Joint-Stock Company “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL”

Shershnev E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of General Physics of Francisk Skorina Gomel State University

Nikitjuk Y. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs of Francisk Skorina Gomel State University

Sokolov S. I., Senior Lecturer at the Department of General Physics of Francisk Skorina Gomel State University

Aushev I. Y., Cand. of Sci., Associate Professor, Professor at the Department of Industrial Safety of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovietskaya St., 104
Francisk Skorina Gomel State University
Tel.: +375 232 50-38-17
E-mail: sokolov@gsu.by
Sokolov Sergej Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.049.774.3

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Я. Д. ГАЛКИН^{1,2}, О. В. ДВОРНИКОВ³, В. А. ЧЕХОВСКИЙ², Н. Н. ПРОКОПЕНКО⁴

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета
(г. Минск, Республика Беларусь)

³ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 30.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Для удовлетворения существующей потребности отечественного рынка радиоэлектронной аппаратуры в быстродействующих широкополосных операционных усилителях ранее было предложено использование базового матричного кристалла МН2ХА031, содержащего комплементарные биполярные транзисторы, совместно с разработанными схемами быстродействующего операционного ОАmp9 и прецизионного операционного ОАmp10 усилителей с унифицированными каскадами и возможностью программирования таких параметров, как ток потребления, максимальный выходной ток, полоса пропускания, скорость нарастания выходного напряжения. В статье рассмотрено увеличение быстродействия указанных операционных усилителей за счет уменьшения паразитной коллекторной емкости транзисторов подачей обратного напряжения смещения в ОАmp9 и применения корректирующих цепей в ОАmp10, что позволило увеличить скорость нарастания выходного напряжения на 29 % в первом случае и в 3,1 раза во втором. Приведены электрические схемы и результаты схемотехнического моделирования модернизированных усилителей, названных ОАmp9М и ОАmp10М, которые соответственно характеризуются напряжением смещения нуля 0,35 и 0,03 мВ, коэффициентом усиления напряжения $2,7 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^5$, произведением коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания 161 МГц и 68 МГц, скоростью нарастания выходного напряжения 708 и 64,5 В/мкс.

Ключевые слова: быстродействующий операционный усилитель, прецизионный операционный усилитель, базовый матричный кристалл, комплементарные биполярные транзисторы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Схемотехническая модернизация операционных усилителей для увеличения скорости нарастания выходного напряжения / Я. Д. Галкин [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53>.

CIRCUIT DESIGN MODERNIZATION OF OPERATIONAL AMPLIFIERS FOR INCREASING SLEW RATE OF OUTPUT VOLTAGE

YAROSLAV D. GALKIN^{1,2}, OLEG V. DVORNIKOV³, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI²,
NIKOLAY N. PROKOPENKO⁴

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

³JSC "Minsk Research Instrument-Making Institute" (Minsk, Republic of Belarus)

⁴Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Submitted 30.01.2023

Abstract. To meet the existing needs of the domestic market of radio electronic equipment in high-speed wideband operational amplifiers, it was previously proposed to use the MH2XA031 master slice array containing complementary bipolar transistors, together with the developed circuits of the OAmpl9 high-speed operational amplifier and the OAmpl10 precision operational amplifier with unified cascades and the ability to program parameters such as current consumption, maximum output current, bandwidth, slew rate. The article discusses the increase in the performance of these operational amplifiers by reducing the parasitic collector capacitance of transistors by applying a reverse bias voltage to OAmpl9 and using correction circuits in OAmpl10, which made it possible to increase the output voltage slew rate by 29 % in the first case and 3.1 times in the second. The electrical circuits and the results of circuit simulation of the upgraded amplifiers, called OAmpl9M, OAmpl10M, are presented, which are respectively characterized by a zero offset voltage of 0.35 and 0.03 mV, a voltage gain of $2.7 \cdot 10^3$ and $3 \cdot 10^5$, the gain bandwidth product 161 and 68 MHz, output voltage slew rate 708 and 64.5 V/ μ s.

Keywords: high speed operational amplifier, precision operational amplifier, master slice array, complementary bipolar transistors.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Galkin Ya. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N. (2023) Circuit Design Modernization of Operational Amplifiers for Increasing Slew Rate of Output Voltage. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53> (in Russian).

Введение

Быстродействующие широкополосные операционные усилители (ОУ) широко применяются в различной аппаратуре двойного и специального назначения. Проведенный анализ рынка таких изделий позволил отметить следующее [1]:

– в настоящее время затруднена возможность приобретения зарубежных микроселектронных устройств, в том числе быстродействующих широкополосных ОУ;

– большинство из быстродействующих ОУ проектируется на комплементарных биполярных (КБ) транзисторах [2, 3] с малой паразитной емкостью коллектора, обеспечиваемой за счет применения диэлектрической изоляции интегральных элементов. Такие технологические маршруты отсутствуют на отечественных предприятиях;

– возможным решением отсутствующих маршрутов являются одновременное проведение работ по проектированию быстродействующих ОУ для имеющегося КБ-техмаршрута ЗСВТ (ОАО «Интеграл») [4] и модернизация техмаршрута изготовления микросхем с целью уменьшения паразитной емкости коллектора и увеличения граничной частоты КБ-транзисторов;

– относительно невысокая потребность отечественного рынка в быстродействующих ОУ делает целесообразным их проектирование на базовом матричном кристалле (БМК) MH2XA031 [5], изготовленном по ЗСВТ-техмаршруту.

Ранее на БМК MH2XA031 [5] были разработаны два быстродействующих ОУ с унифицированными каскадами и возможностью программирования параметров, в одном из которых (OAmpl9) значительно улучшены динамические параметры (скорость нарастания выходного напряжения (output voltage slew rate, SL), произведение коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания (gain band width product, GBP)), а в другом (OAmpl10) – статические параметры (напряжение смещения нуля V_{OFF} , коэффициент усиления напряжения K_V при разомкнутой цепи отрицательной обратной связи, и уровень шума) [1]. В статье рассматриваются модернизированные схемы ОУ (OAmpl9M, OAmpl10M) с увеличенной скоростью нарастания выходного напряжения.

Результаты схемотехнической и параметрической модернизации

Электрические схемы модернизированных ОУ для программного обеспечения LTSpice приведены на рис. 1, 2.

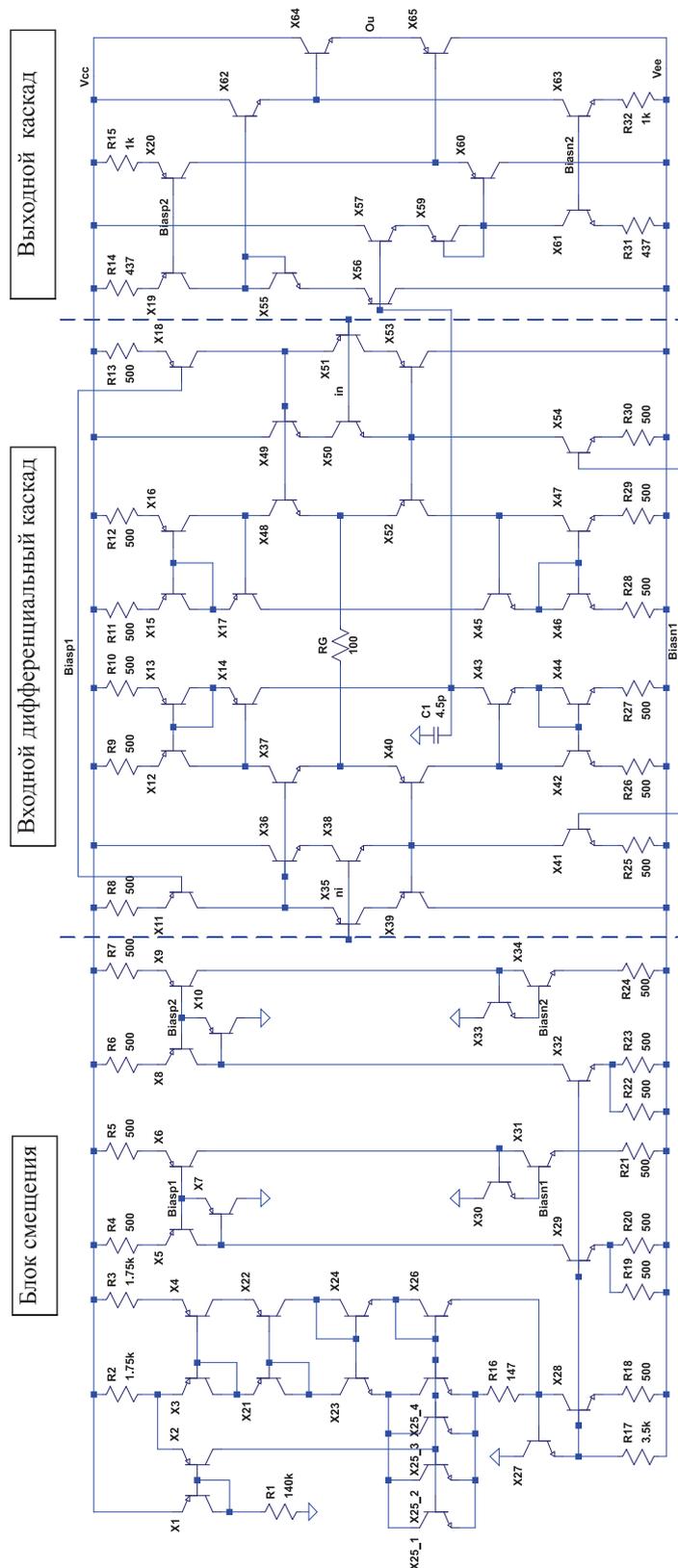


Рис. 1. Электрическая схема операционного усилителя OAm9M
Fig. 1. Electrical circuit of the OAm9M operational amplifier

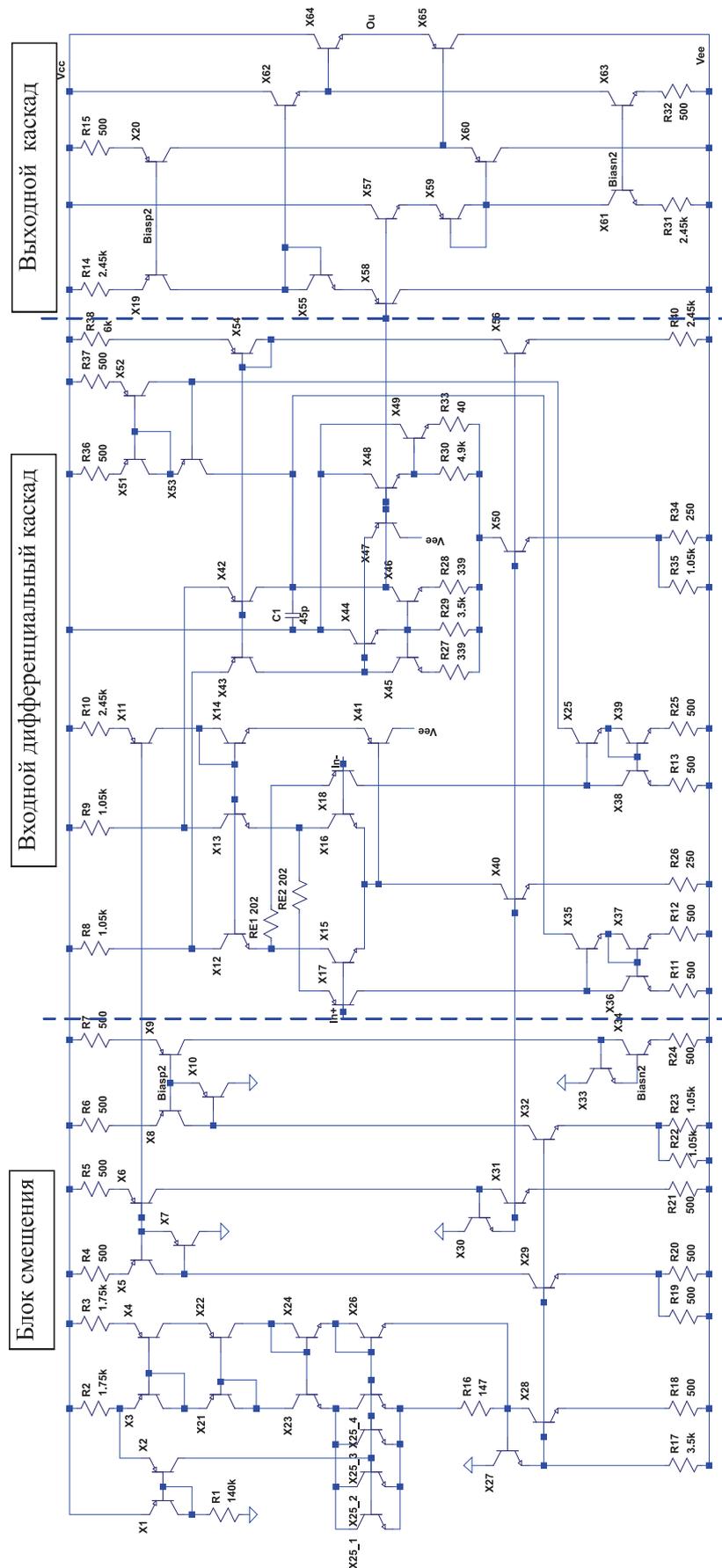


Рис. 2. Электрическая схема операционного усилителя OAmpl10M
Fig. 2. Electrical circuit of the OAmpl10M operational amplifier

Каждый ОУ содержит одинаковые по схемотехнике блок смещения и выходной каскад и разные входные дифференциальные каскады. Узлы с одинаковым наименованием (V_{CC} , V_{EE} , $Biasn1$, $Biasn2$, $Biasp1$, $Biasp2$) внутри каждого ОУ соединены. Указанные на схемах сопротивления резисторов получены последовательно-параллельным соединением имеющихся на БМК резисторов с сопротивлениями 1,00 и 2,45 кОм. Так, резистор $R38 = 6$ кОм на рис. 2 представляет собой соединение 2,45 кОм + 2,45 кОм + 1 кОм + 1 кОм/10. Программирование параметров каждого входного дифференциального каскада осуществляется в блоке смещения отключением резистора $R19$, а изменение нагрузочной способности выходного каскада – отключением $R22$. Блок смещения построен по типовой схеме РТАТ-источника тока (proportional to absolute temperature) [6] с цепью запуска на $X1$, $X2$, $R1$. Подробно работа отдельных блоков рассмотрена в [1].

Заметим, что схемы на рис. 1, 2 приведены без каких-либо упрощений и сокращений. Это позволяет, с одной стороны, показать достаточность использования только двух имеющихся на БМК резисторов с сопротивлениями 1,00 и 2,45 кОм для получения требуемого отношения сопротивлений, а с другой – непосредственно применять рассматриваемые ОУ и их отдельные блоки в других разработках аналоговых схем. КБ-транзисторы на схемах обозначены префиксом X , что в соответствии с правилами LTSpice указывает на то, что эти элементы реализованы в виде подсхем.

Известно, что на быстродействие ОУ существенно влияет паразитная емкость, соединенная с коллектором. Применяемые подсхемы транзисторов на рис. 3, 4 позволяют адекватно учесть это влияние, так как паразитная емкость коллектора $n-p-n$ -транзистора ($DSubnnpn$) подключена между коллектором и глобальным узлом sub , а $p-n-p$ -транзистора ($DWpnp$) – между коллектором и глобальным узлом w , которые при моделировании соединены с отдельными источниками напряжения V_S и V_W соответственно

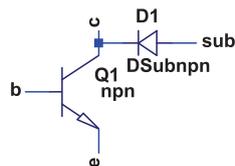


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема $n-p-n$ в LTSpice

Fig. 3. Equivalent electrical circuit $n-p-n$ in LTSpice

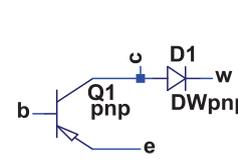


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема $p-n-p$ в LTSpice

Fig. 4. Equivalent electrical circuit $p-n-p$ in LTSpice

Отличие модернизированного ОУ OАmp9M от исходного минимально, а именно: $R22 = R23 = 500$ Ом (было 1 кОм), $R_G = 100$ Ом (было 140 Ом), $R14 = R31 = 437$ Ом (было 500 Ом). Однако при схемотехническом моделировании были применены уточненные Spice-параметры диодов $DSubnnpn$, $DWpnp$ и изучено влияние абсолютной величины напряжения источников V_S и V_W на скорость нарастания выходного напряжения.

В OАmp10M тоже несколько изменены сопротивления резисторов: $R14 = R31 = 2,45$ кОм (было 9,5 кОм), $R27 = R28 = 339$ Ом (было 250 Ом), введены повторители тока на $n-p-n$ ($X35-X37$; $X25$, $X38$, $X39$) и $p-n-p$ ($X51-X53$) транзисторах и цепи ($RE1$, $X18$; $RE2$, $X17$), формирующие импульс тока при большой амплитуде входного импульса ОУ, похожие на решение, приведенное в [7]. Тщательный анализ нескольких вариантов корректирующих цепей, увеличивающих быстродействие ОУ, будет выполнен в отдельной статье.

Результаты схемотехнического моделирования скорости нарастания выходного напряжения на рис. 5, 6 иллюстрируют эффективность принятых мер, особенно для OАmp10M, а данные табл. 1 подтверждают высокий уровень параметров модернизированных усилителей.

Таблица 1. Результаты схемотехнического моделирования операционных усилителей
Table 1. Results of circuit simulation of the operational amplifiers

Параметр / Parameter	Операционный усилитель / Operational amplifier	
	OАmp9M	OАmp10M
Напряжение питания V_{CC} , В	-5/5	-5/5
Ток потребления в режиме холостого хода I_{CC} , мА	21,73	8,53
Напряжение смещения нуля V_{OFF} , мВ	0,35	0,03
Коэффициент усиления напряжения K_V	$2,7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Параметр / Parameter	Операционный усилитель / Operational amplifier	
	OАmp9M	OАmp10M
Входной ток I_{IN} , мкА	2,71	8,75
Произведение коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания GBP , МГц	161*/620**	68*
Минимальный запас по фазе в полосе пропускания Δ	40*/68**	46*
Максимальная скорость нарастания выходного напряжения SL , В/мкс	708*	64,5
Спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу, e_N , нВ/Гц ^{0,5} , при частоте 1 кГц	2,64	1,15
* $K_V = 1$, $C_1 = 4,5$ пФ для OАmp9M. ** $K_V = 10$, $C_1 = 1$ пФ для OАmp9M.		

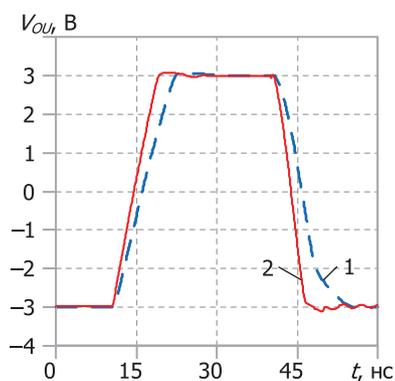


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения V_{OU} от времени t при включении операционных усилителей как повторителей напряжения: 1 – OАmp9 при $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 5$ В; 2 – OАmp9M при $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 10$ В
Fig. 5. $V_{OU}(t)$ characteristics when operational amplifiers are connected as a voltage follower: 1 – OАmp9 when $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 5$ V; 2 – OАmp9M when $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 10$ V

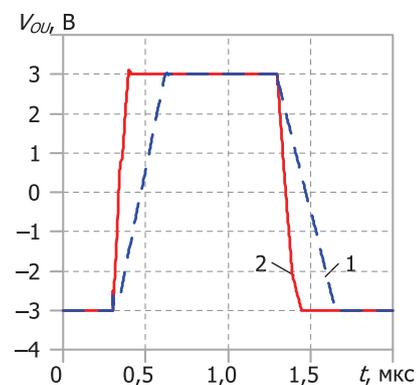


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения V_{OU} от времени t при включении операционных усилителей как повторителей напряжения: 1 – OАmp10; 2 – OАmp10M
Fig. 6. $V_{OU}(t)$ characteristics when operational amplifiers are connected as a voltage follower: 1 – OАmp10; 2 – OАmp10M

Заключение

1. Для элементов базового матричного кристалла МН2ХА031 модернизированы схемы двух операционных усилителей, названных OАmp9M и OАmp10M. Схемотехническое моделирование показало, что OАmp9M характеризуется следующими параметрами: $K_V > 2,7 \cdot 10^3$, $V_{OFF} < 0,35$ мВ, $GBP > 161$ МГц и $SL > 708$ В/мкс, а OАmp10M – $K_V > 3 \cdot 10^5$, $V_{OFF} < 0,03$ мВ, $GBP > 68$ МГц и $SL > 64,5$ В/мкс.

2. Схемотехническая и параметрическая модернизация позволила увеличить скорость нарастания выходного напряжения OАmp9M на 29 % по сравнению с OАmp9 и в 3,1 раза в OАmp10M по сравнению с OАmp10.

3. Эффективность корректирующих цепей в OАmp10M стимулирует продолжение работ в этой области, результаты которых будут рассмотрены в отдельной статье.

Список литературы

1. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле / О. В. Дворников [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 1. С. 96–111. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111.
2. Bowers, D. F. Recent Developments in Bipolar Operational Amplifiers / D. F. Bowers, S. A. Wurcer // Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Cat. No 99CH37024, 28–28 Sept. 1999. P. 38–45. DOI: 10.1109/BIPOL.1999.803521.

3. Close, J. High Speed OP Amps: Performance, Process and Topologies / J. Close // 2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). P. 1–8. DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.
4. Прокопенко, Н. Н. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков / Н. Н. Прокопенко, О. В. Дворников, А. В. Бугакова. М.: СОЛОН-Пресс, 2021.
5. Проектирование аналоговых микросхем для экстремальных условий эксплуатации на основе базового матричного кристалла МН2ХА031 / О. В. Дворников [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 2. С. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-37-46>.
6. Дворников, О. В. Схемотехника биполярно-полевых аналоговых микросхем. Ч. 3. Источники тока, управляемые током с нерегулируемым коэффициентом передачи / О. В. Дворников // ChipNews. 2005. № 1. С. 12–15.
7. Прокопенко, Н. Н. Дифференциальный операционный усилитель с повышенным быстродействием / Н. Н. Прокопенко // Приборы и техника эксперимента. 1978. № 2. С. 153–154.

References

1. Dvornikov O. V., Chekhovsky V. A., Prokopenko N. N., Galkin Y. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2023) High-Speed Wideband Operational Amplifiers on Master Slice Array. *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 28 (1), 96–111. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111 (in Russian).
2. Bowers D. F., Wurcer S. A. (1999) Recent Developments in Bipolar Operational Amplifiers. *Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Cat. No 99CH37024, 28–28 Sept. 1999*. 38–45. DOI: 10.1109/BIPOL.1999.803521.
3. Close J. (2012) High Speed OP Amps: Performance, Process and Topologies. *2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM)*. 1–8. DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.
4. Prokopenko N. N., Dvornikov O. V., Bugakova A. V. (2021) *Designing Low-Temperature and Radiation-Hardened Analog Circuits for Processing Sensor Signals*. Moscow, SOLON-Press Publ. (in Russian).
5. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N., Galkin Y. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2021) Analog Integrated Circuits Design for Extreme Environmental Conditions on the Base of Master Slice Array МН2ХА031. *Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*. (2), 37–46. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-37-46> (in Russian).
6. Dvornikov O. V. (2005) Schematics of Bipolar-Field Analog Microcircuits. Part. 3 Current Controlled Current Sources with Unregulated Transfer Ratio. *Chip News*. (1), 12–15 (in Russian).
7. Prokopenko N. N. (1978) Differential Operational Amplifier with Increased Performance. *Pribory i Tehnika Eksperimenta*. (2), 153–154 (in Russian).

Вклад авторов

Галкин Я. Д. выполнил схемотехническое моделирование и параметрическую оптимизацию операционных усилителей.

Дворников О. В. выполнил анализ современного состояния проблемы по теме работы, сформулировал цель и задачи исследований, провел идентификацию параметров моделей.

Чеховский В. А. участвовал в схемотехническом моделировании и параметрической оптимизации OАmp10M.

Прокопенко Н. Н. предложил и обосновал введение дополнительных цепей, увеличивающих быстродействие OАmp10M.

Authors' contribution

Galkin Ya. D. has performed circuit simulation and parametric optimization of operational amplifiers.

Dvornikov O. V. has analyzed the current state of the problem, formulated the goals and objectives of the work, has performed the identification of model parameters.

Tchekhovskiy V. A. has taken part in circuit simulation and parametric optimization of OАmp10M.

Prokopenko N. N. has proposed and substantiated the insertion of additional circuits that increase the performance of OАmp10M.

Сведения об авторах

Галкин Я. Д., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, мл. н. с. лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Дворников О. В., д. т. н., доцент, гл. н. с. ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

Чеховский В. А., заведующий лабораторией электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Прокопенко Н. Н., д. т. н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 25 725-07-75
E-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Галкин Ярослав Денисович

Information about the authors

Galkin Ya. D., Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at the Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of the NRU “Research Institute for Nuclear Problems” of the Belarusian State University

Dvornikov O. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Principal Researcher at the JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”

Tchekhovski V. A., Head of the Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of the NRU “Research Institute for Nuclear Problems” of the Belarusian State University

Prokopenko N. N., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information Systems and Radioelectronics Department of the Don State Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 725-07-75
E-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Galkin Yaroslav Denisovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2/.3-046.47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ПРОЦЕССОРОВ ПРИ ПОМОЩИ КУЛЕРОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Г. А. ПИСКУН, В. Ф. АЛЕКСЕЕВ, А. Н. БЕЛИКОВ, Д. Г. РЫБАКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 30.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Представлены результаты исследования по отведению тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров с воздушным охлаждением (КВО). Проведены четыре эксперимента, в которых при помощи трехмерного твердотельного параметрического моделирования выявлены наиболее эффективные варианты исполнения КВО. В первом эксперименте был разработан башенный радиатор с несущей конструкцией в виде медных прутков и установленным вертикально вентилятором. Это дало возможность определить эффективность передачи тепловой энергии по радиатору. В следующем эксперименте в разработанной ранее модели заменили медные прутки на тепловые трубки и убрали вентилятор, что позволило обосновать необходимость наличия или отсутствия обдува при постепенном увеличении мощности процессора во время его эксплуатации. В третьем случае изменяли скорость вращения вентилятора, благодаря чему установили предельную скорость воздушного потока для эффективного охлаждения радиатора. В последнем эксперименте определили оптимальную конструкцию КВО, позволившую эффективно реализовать рассеивание тепловой энергии от процессора при различной его мощности. Экспериментально доказана необходимость использования КВО в таких современных технических средствах, как персональные компьютеры, сервера, вычислительные комплексы и т. д., в которых нет ограничений по обеспечению массогабаритных параметров.

Ключевые слова: кулер воздушного охлаждения, моделирование, нагрев, процессор, тепловые трубки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62>.

SIMULATION OF THERMAL ENERGY REMOVAL FROM PROCESSORS USING AIR COOLERS

GENNADY A. PISKUN, VIKTOR F. ALEXEEV, ANDREY N. BELIKOV,
DMITRY G. RYBAKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30.01.2023

Abstract. The results of a study on the removal of thermal energy from processors using air coolers (AC) are presented. Four experiments were carried out, in which, with the help of three-dimensional solid-state parametric modeling of various versions of the AC, the most effective ones were identified. In the first experiment, a tower radiator with a supporting structure in the form of copper bars and a vertically mounted fan was developed, which made it possible to determine the efficiency of heat transfer through the radiator. In the next experiment, in the

previously developed model, copper bars were replaced with heat pipes and the fan was removed, which made it possible to substantiate the need for the presence or absence of airflow with a gradual increase in processor power during its operation. In the third case, the possibility of changing the fan speed was implemented, which made it possible to set the maximum air flow rate for efficient cooling of the radiator. In the last experiment, the optimal design of the AC was established, which made it possible to effectively implement the dissipation of thermal energy from the processor at various power levels. The necessity of using AC in such modern technical means as personal computers, servers, computer systems, etc., in which there are no restrictions on providing weight and size parameters has been experimentally proved.

Keywords: air cooler, modeling, heating, processor, heat pipes.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. (2023) Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62> (in Russian).

Введение

В настоящее время при проектировании и разработке современных технических средств различного функционального назначения имеется огромное разнообразие способов охлаждения входящих в их состав интегральных схем (ИС) разной мощности, которые основываются на различных физических явлениях [1–3]. При этом одна из наиболее важных задач – изучение и понимание того, каким образом реализовать эффективное охлаждение высокопроизводительных элементов и как сконструировать устройство с учетом высоких требований в области массогабаритных параметров. Сегодня наиболее эффективный способ отведения тепла от ИС мощностью в несколько десятков ватт – использование кулеров воздушного охлаждения (КВО), состоящих из четырех основных элементов – теплоемника, тепловых трубок, радиатора и вентилятора.

Теплоемник устанавливается на нагревающийся элемент устройства (например, чип процессора или видеокарты, сильно греющиеся элементы системы стабилизации напряжения питания и т. д.) и представляет собой металлическую пластину, чаще всего сделанную из меди, с переходом на тепловые трубки. Данные трубки соединяют между собой теплоемник и радиатор охлаждения и передают тепло от первого ко второму посредством конвективного переноса тепла содержащейся внутри легкокипящей жидкостью (т. е. жидкость испаряется на горячем конце трубки, поглощая теплоту испарения, и конденсирует на холодном, откуда перемещается обратно на горячий конец). Радиатор охлаждения в большинстве случаев имеет конструкцию, состоящую из ряда параллельных пластин (преимущественно алюминиевых), структурирующих движение воздуха, пронизанных тепловыми трубками. Для повышения эффективности таких систем используется вентилятор, обдувающий радиатор холодным воздухом, поступающим в технические средства через перфорационные отверстия.

Цель исследований – обоснование эффективности использования КВО для отведения избыточного тепла от интегральных микросхем. В частности, в программной среде SolidWorks Flow Simulation реализовано трехмерное твердотельное параметрическое моделирование различных вариантов исполнения таких систем с определением наиболее эффективных.

Исходные данные и постановка задачи

При построении моделей КВО использовали программу для параметрического моделирования конвективного потока SolidWorks Flow Simulation, в которой разработали трехмерную модель (рис. 1), точно повторяющую форму и размеры одного из самых широко распространенных башенных радиаторов – DeepCool GAMMAXX 300 [4]. В качестве источника тепла был выбран процессор AMD Ryzen™ 7 5800X [5].

Разработанный в среде SolidWorks Flow Simulation проект основывался на уже заложенных в нее физических закономерностях конвективного теплообмена в газовой среде с учетом особенностей теплопроводности в твердых телах. Использовали следующие исходные данные и оборудование:

- мощность тепловыделения процессора 20–105 Вт [5], в пиковых режимах эксплуатации может возрасти до 120 Вт [6];
- температура воздуха в отапливаемом помещении 20 °С (293 К);



Рис. 1. Внешний вид (a) и трехмерная модель (b) кулера воздушного охлаждения
Fig. 1. External view (a) and three-dimensional model (b) of the air cooler

- скорость воздушного потока 0–10 м/с [4];
- параметры теплопроводности материалов для составных частей модели (материал высокой теплопроводности (4 кВт/(м·К)) [7] для тепловых трубок и алюминий для всех остальных);
- характеристики неучтенных в модели дополнительных прослоек, создающих важные для учета тепловые сопротивления, таких как термопасты между основанием радиатора (теплосъемником) и крышкой процессора и припой между тепловыми трубками и ребрами радиатора:
 - толщина слоя термопасты между процессором и теплосъемником 0,08 мм;
 - теплопроводность термопасты 4 Вт/(м·К) [8];
 - толщина слоя припоя между тепловыми трубками и контактирующими поверхностями 0,05 мм;
- радиатор конструкции башенного типа размерами 121×135,7×75,5 мм, состоящий из теплосъемной площадки в основании и горизонтальных алюминиевых ребер (68 отдельных алюминиевых пластин), соединенных проходящими сквозь них тремя тепловыми трубками диаметром 6 мм и незначительно выходящих наружу корпуса [4];
- вентилятор с гидродинамическим типом подшипника, способный работать в режиме PWM, т. е. автоматической регулировки оборотов, которые составляют 900 об/мин в минимальном режиме и 1600 об/мин – в максимальном [4];
- рассеиваемая мощность вентилятора – до 130 Вт [4].

Для выявления причин применения некоторых конструктивно-технологических решений в структуре КВО провели следующие эксперименты.

Эксперимент № 1: в радиаторе башенного типа использовались пронизывающие ребра медные прутки диаметром 6 мм для того, чтобы установить эффективность передачи тепловой энергии от теплосъемника до радиатора, а также постепенное повышение скорости обдува воздухом от 0 до 1,7 м/с для выявления целесообразности использования принудительной системы охлаждения.

Эксперимент № 2: разработана модель конструкции радиатора башенного типа с алюминиевыми ребрами, которая пронизана тремя тепловыми трубками диаметром 6 мм без дополнительной системы принудительного охлаждения. В процессе исследований устанавливали необходимость наличия или отсутствия обдува при постепенном увеличении мощности процессора.

Эксперимент № 3: определение предельной скорости движения воздушного потока для эффективного отведения тепла от радиатора по сформированным межреберным тепловым каналам. Исследования позволили установить влияние скорости движения газовой среды на эффективность рассеивания тепловой энергии с радиатора и выявить причину, почему на практике редко применяются кулеры со скоростью воздушного потока более 2 м/с.

Эксперимент № 4: определение предельной мощности рассеивания тепловой энергии от процессора для различных режимов его эксплуатации (от 20 до 100 Вт) с помощью смоделированного радиатора башенного типа с установленными тепловыми трубками и вентилятором при поэтапном увеличении скорости обдува от 0 до 1,7 м/с.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При помощи разработанной компьютерной модели КВО, состоящей из радиатора башенного типа с горизонтально установленными алюминиевыми ребрами, пронизанными медными прутками диаметром 6 мм, и вентилятора, осуществляющего обдув воздухом со скоростью 0–1,7 м/с,

установлено, что процессор при увеличении его мощности от 20 до 120 Вт охлаждается недостаточно эффективно (рис. 2).

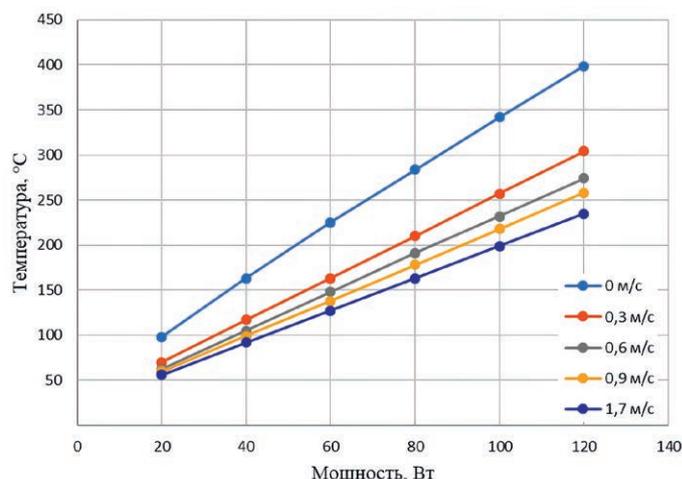


Рис. 2. Зависимость температуры теплоъемника от мощности процессора в случае отсутствия тепловых трубок и наличия дополнительного обдува

Fig. 2. Temperature dependence of heat spreader on processor power in the absence of heat pipes and the presence of additional airflow

Согласно результатам моделирования, максимально теплонагруженная область – это теплоъемник радиатора. В частности, при моделировании радиатора с медными прутками без дополнительного обдува при мощности процессора 20 Вт теплоъемник нагревается до 97,81 °С, что является предельным значением температуры процессора и свидетельствует о неэффективном использовании радиатора. В случае дополнительного обдува воздухом со скоростью 1,7 м/с (при мощности процессора 120 Вт) теплоъемник нагревается до 234,30 °С, что значительно превышает предельное значение температуры процессора и свидетельствует не только о неэффективном использовании радиатора, но и может привести к катастрофическому отказу самого процессора (рис. 3).

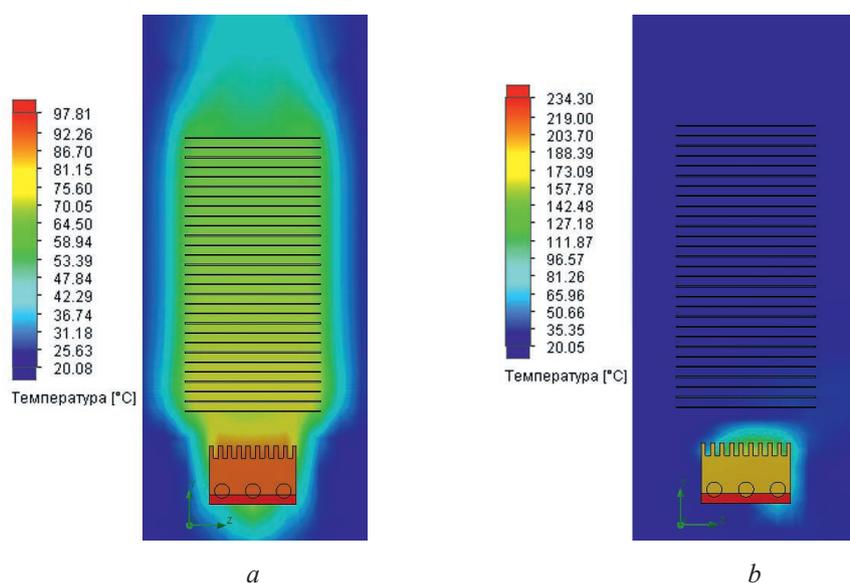


Рис. 3. Модель радиатора с медными прутками без обдува при мощности процессора 20 Вт (a) и результаты моделирования охлаждения процессора с обдувом воздухом со скоростью 1,7 м/с при мощности процессора 120 Вт (b)

Fig. 3. Model of a heatsink with copper bars without airflow at a processor power of 20 W (a) and the results of a processor cooling simulation with airflow at a speed of 1.7 m/s at a processor power of 120 W (b)

Полученные в первом эксперименте значения температур свидетельствуют о том, что разработанная модель радиатора неэффективна при проектировании системы охлаждения процессоров. Поэтому необходимо применение дополнительных мер по организации отведения тепловой энергии от него, в частности, использование тепловых трубок вместо медных прутков для передачи большего количества тепла.

При помощи ранее разработанной модели конструкции радиатора башенного типа с алюминиевыми ребрами, которые пронизаны тремя тепловыми трубками диаметром 6 мм без дополнительной системы принудительного охлаждения, установлено, что работа системы охлаждения в пассивном режиме может использоваться только при низких мощностях (около 20 Вт). Необходимо принудительное охлаждение для рассеивания большего количества тепла. По результатам моделирования построен график зависимости температуры теплоотвода от мощности процессора при пассивном охлаждении (рис. 4).

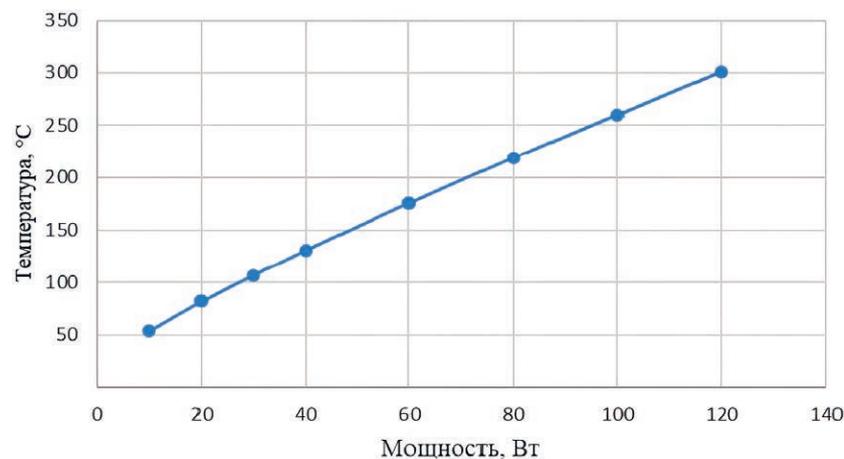


Рис. 4. Зависимость температуры теплоотвода от мощности процессора при пассивном охлаждении

Fig. 4. Temperature dependence of heat spreader on processor power with passive cooling

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что температура от поверхности процессора эффективно отводится и распределяется по всей поверхности башенного радиатора, а не концентрируется только в области теплоотвода (рис. 5).

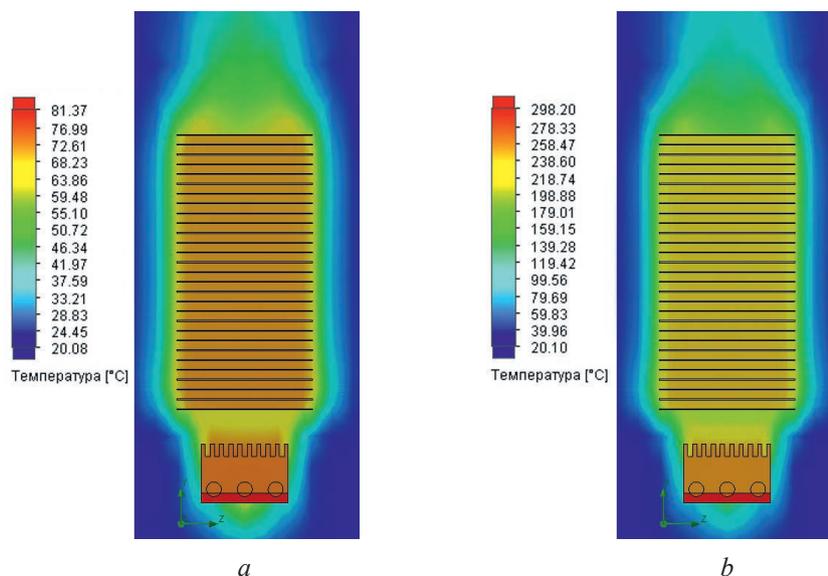


Рис. 5. Результаты моделирования охлаждения процессора мощностью 20 Вт (a) и 120 Вт (b) при помощи радиатора с тепловыми трубками без дополнительной системы вентиляции

Fig. 5. Results of the simulation of processor cooling with a power of 20 W (a) and 120 W (b) using a heatsink with heat pipes without an additional ventilation system

В частности, при моделировании радиатора с медными прутками без дополнительного обдува при мощности процессора 20 Вт теплоемник нагревался до 97,81 °С, а с использованием тепловых трубок – до 81,37 °С. В случае дополнительного обдува воздухом со скоростью 1,7 м/с (при мощности процессора 120 Вт) теплоемник нагревался до 234,30 °С, а при использовании тепловых трубок без дополнительного обдува – до 298,2 °С. Таким образом, использование только тепловых трубок в башенном радиаторе для охлаждения процессора при его мощности 20 Вт является эффективным, но нецелесообразным из-за больших массогабаритных размеров. При мощности процессора 120 Вт данный радиатор уже не справляется с поставленной задачей, поэтому необходимо дополнительно использовать вентилятор.

При помощи разработанной компьютерной модели башенного радиатора определена предельная скорость движения воздушного потока для эффективного отведения тепла от радиатора по сформированным межреберным тепловым каналам. Это позволяет установить зависимость влияния скорости движения газовой среды на эффективность рассеивания тепловой энергии с радиатора и выбрать вентилятор для лучшего отведения тепловой энергии. Согласно рис. 6, зависимость температуры теплоемника от скорости воздушного потока имеет логарифмический вид, и дальнейшее увеличение скорости не дает значительного снижения температуры. Также это подтверждается тем, что на практике в персональных компьютерах используются вентиляторы, создающие воздушный поток, скорость которого редко превышает 2 м/с, т. е. входят в зону почти линейного падения температуры. Это обусловлено тем, что уже при относительно невысокой скорости воздуха тепловое сопротивление между ребрами радиатора и средой уменьшается настолько, что снижать его дальше не целесообразно, а разность температур при этом составляет несколько градусов.

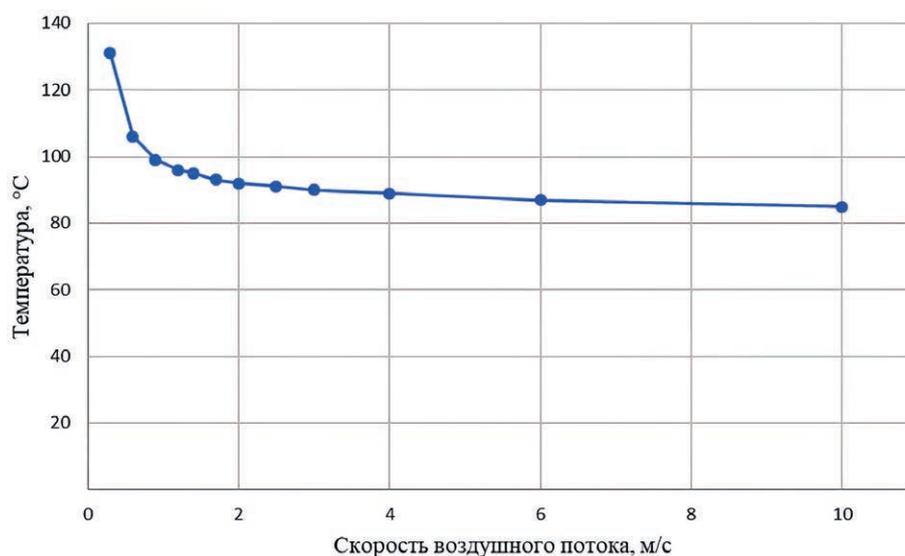


Рис. 6. Зависимость температуры теплоемника от скорости воздушного потока при мощности процессора 100 Вт
Fig. 6. Heat spreader temperature versus airflow rate at 100 W processor power

Согласно рис. 7, обдув вентилятором приводит к значительному снижению температуры радиатора, а именно: при мощности процессора 100 Вт температура процессора составляет 136,69 °С для скорости воздуха 0,3 м/с, 92,41 °С – для 1,7 м/с и 83,83 °С – для 10 м/с. Падение температуры на 31,34 °С происходит при изменении скорости воздуха на 1,4 м/с, и на 9,5 °С – при изменении скорости на 8,3 м/с.

По результатам экспериментов установлено, что наиболее эффективно использовать КВО, состоящие из радиаторов башенного типа с установленными тепловыми трубками и вентилятором для охлаждения процессоров. Определена предельная мощность рассеивания тепловой энергии от процессора при различных режимах его эксплуатации (от 20 до 100 Вт), полученная в результате моделирования радиатора в случае поэтапного увеличения скорости его обдува от 0 до 1,7 м/с (табл. 1).

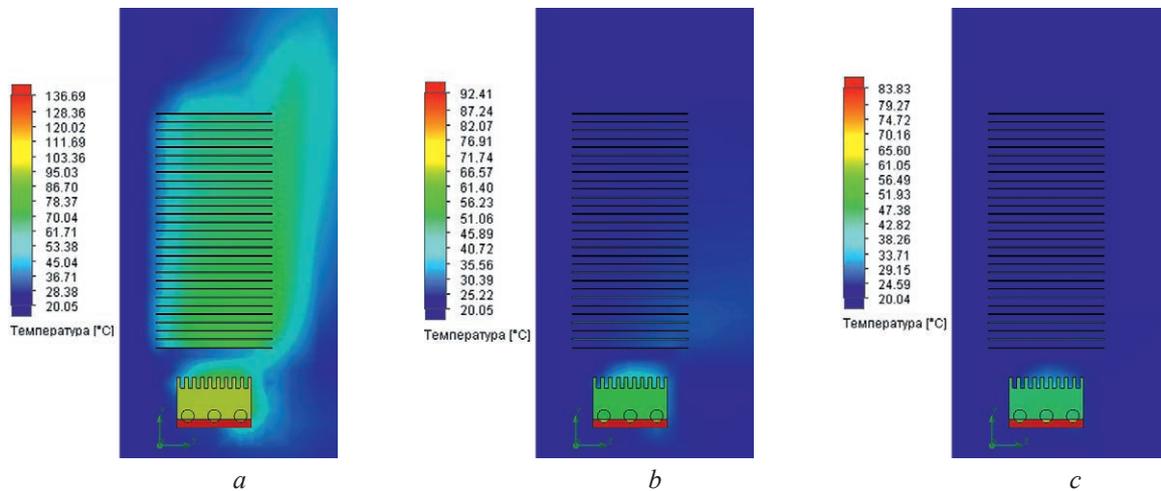


Рис. 7. Результаты моделирования охлаждения процессора при его постоянной мощности 100 Вт для скорости движения воздуха, м/с: *a* – 0,3; *b* – 1,7; *c* – 10

Fig. 7. Processor cooling simulation results at a constant power of 100 W for at air speeds, m/s: 0 *a* – 0.3; *b* – 1.7; *c* – 10

Таблица 1. Результаты расчета температуры процессора при различных значениях скорости обдува радиатора и мощности процессора
Table 1. Results of calculating the processor temperature for various values of the heatsink blowing speed and processor power

Мощность, Вт / Power, W	Обдув, м/с / Airflow, m/s					
	0	0,3	0,6	0,9	1,3	1,7
Температура процессора, °C / Processor temperature, °C						
20	82	42	37	36	32	35
40	131	66	54	51	50	49
60	176	89	72	67	67	64
80	219	113	88	83	80	78
100	260	137	105	98	95	93

Исходя из результатов расчетов, можно сделать вывод, что наиболее эффективным кулером воздушного охлаждения будет башенный радиатор с тепловыми трубками и вентилятором, обдувающим процессор мощностью 60 Вт воздухом со скоростью от 1,3 м/с (рис. 8).

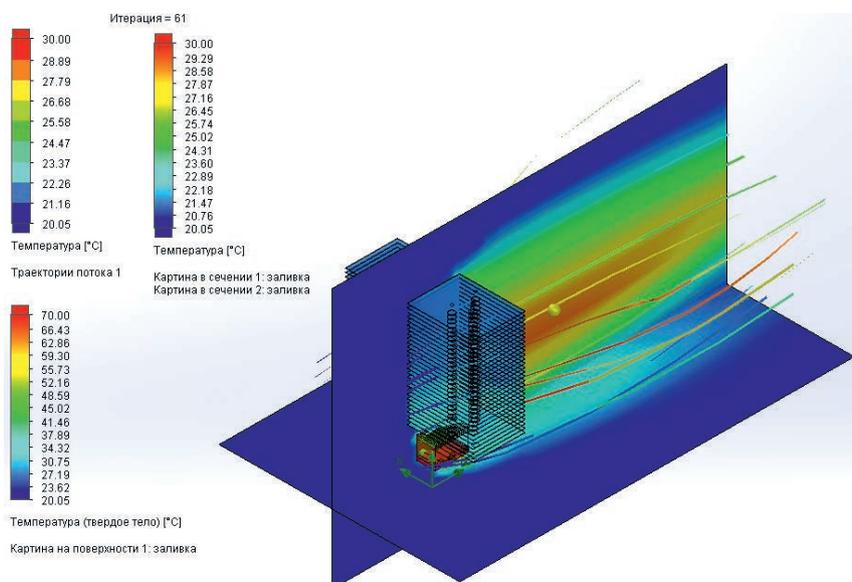


Рис. 8. Тепловая картина сформированной вентилятором воздушной массы, обдувающей со скоростью 1,3 м/с процессор мощностью 60 Вт

Fig. 8. Thermal image of air mass formed by a fan blowing at a speed of 1.3 m/s on a 60 W processor

С увеличением мощности процессор достигнет критической температуры 100 °С и перегреется, вследствие чего сбросит свою тактовую частоту, что негативно отразится на его производительности. Наличие максимальной мощности напрямую связано с наличием определенного значения теплового сопротивления «процессор – среда», которое обусловлено и характеризуется конструкцией КВО, скоростью воздушного потока, проходящего через ребра радиатора, а также качеством контакта между процессором и теплосъемной пластиной. Если скорость воздушного потока с легкостью достигает оптимальных значений, то задача уменьшения других тепловых сопротивлений является более сложной и чаще всего требует значительного повышения стоимости кулера.

Заключение

1. Разработаны три модели кулеров с воздушным охлаждением: первая – башенный радиатор с несущей конструкцией в виде медных прутков, вторая – башенный радиатор с несущей конструкцией в виде тепловых трубок, третья – башенный радиатор с несущей конструкцией в виде тепловых трубок и вентилятором процессоров. Проведены эксперименты по определению эффективности отвода тепловой энергии от процессора при помощи вышеприведенных моделей, а также по определению необходимой скорости движения воздуха.

2. На основании исследований установлено, что наиболее эффективным способом охлаждения современных теплонагруженных элементов является использование башенных радиаторов с тепловыми трубками и вентилятором, осуществляющим обдув воздухом со скоростью не более 2 м/с.

Список литературы

1. Основы силовой электроники / А. И. Белоус [и др.]. М.: Техносфера, 2019. 424 с.
2. The Impact of ESD on Microcontrollers / G. A. Piskun [et al.]. Minsk: Kolorgrad, 2018. 184 p.
3. Remsburg, R. *Advanced Thermal Design of Electronic Equipment* / R. Remsburg. NY: Springer New York, 1998. 589 p.
4. DeepCool. GAMMAXX 300 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.deepcool.com/products/Cooling/cpuaircoolers/2021/12125.shtml>. Дата доступа: 16.01.2023.
5. AMD. Процессор AMD Ryzen™ 7 5800X [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.amd.com/en/products/cpu/amd-ryzen-7-5800x>. Дата доступа: 17.01.2023.
6. 3Dnews. Обзор процессора AMD Ryzen™ 7 5800X [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dnews.ru/1026573/obzor-amd-ryzen-7-5800x>. Дата доступа: 17.01.2023.
7. TehTab.ru. Коэффициент теплопроводности тепловых трубок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ConvectionHeatTransfer1/TableOfOverallCoefficientsForHeatExchangers>. Дата доступа: 17.01.2023.
8. Thermalinfo.ru. Теплопроводность термопаст, сравнение термопаст по теплопроводности и вязкости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnenie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti>. Дата доступа: 17.01.2023.

References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Efimenko S. A., Pilipenko V. A. (2019) *Power Electronics Basics*. Moscow, Technosphere Publ. 424 (in Russian).
2. Piskun G. A., Alexeev V. F., Avakow S. M., Matyushkov V. E., Titko D. S. (2018) *The Impact of ESD on Microcontrollers*. Minsk, Kolorgrad Publ. 184.
3. Remsburg R. (1998) *Advanced Thermal Design of Electronic Equipment*. NY, Springer New York Publ. 589.
4. DeepCool. GAMMAXX 300. Available: <https://ru.deepcool.com/products/Cooling/cpuaircoolers/2021/12125.shtml> (Accessed 16 January 2023).
5. AMD. AMD Ryzen™ 7 5800X. Available: <https://www.amd.com/en/products/cpu/amd-ryzen-7-5800x> (Accessed 17 January 2023).
6. 3Dnews. AMD Ryzen™ 7 5800X Review. Available: <https://3dnews.ru/1026573/obzor-amd-ryzen-7-5800x>. (Accessed 17 January 2023).
7. TehTab.ru. Heat Pipes Heat Transfer Coefficient. Available: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ConvectionHeatTransfer1/TableOfOverallCoefficientsForHeatExchangers> (Accessed 17 January 2023).

8. *Thermalinfo.ru. Thermal Paste Heat Transfer Coefficient, Thermal Pastes Comparison by Thermal Transfer Coefficient and Viscosity.* Available: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti> (Accessed 17 January 2023).

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Пискун Г. А., к. т. н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Алексеев В. Ф., к. т. н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Беликов А. Н., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Рыбаков Д. Г., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 292-22-07
E-mail: alexvikt.minsk@gmail.com
Алексеев Виктор Федорович

Information about the authors

Piskun G. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Design Information and Computer Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Alexeev V. F., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Design Information and Computer Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Belikov A. N., Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Rybakov D. G., Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 292-22-07
E-mail: alexvikt.minsk@gmail.com
Alexeev Viktor Fedorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.373.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРОСОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ ВИБРОЗАЩИТЫ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В. Н. КИЙКО, Н. М. НАУМОВИЧ, М. В. ДАВЫДОВ, В. И. ЖУРАВЛЁВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 10.03.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Исследованы виброизоляторы с демпфирующими свойствами стальных многопроволочных тросов для виброзащиты кварцевых генераторов. Моделирование вибрационных характеристик конструктивных элементов проводилось с использованием численных методов. Рассчитаны упругие характеристики и конструктивные параметры троса для виброизолятора. Проведен гармонический анализ с заданными значениями массы и жесткости при воздействии внешних вибраций. Разработан и изготовлен образец тросового виброизолятора. Для проверки полученных расчетных результатов предложена структура испытательного стенда, позволяющего определять значения собственных резонансных частот. Исследованы зависимости виброускорения от частоты колебаний с возмущающим воздействием по синусоидальному и случайному законам с изменяемой частотой в диапазоне 10–2000 Гц. Испытания тросового виброизолятора показали эффективность подавления вибраций для частот более 120 Гц. В нижнем диапазоне случайных вибраций различные резонансы оказывают существенное влияние друг на друга. Эксперименты подтвердили результаты моделирования и эффективность используемого решения: разность показателей при определении резонансных частот составила менее 10 % при уменьшении уровня вибрации до заданного показателя.

Ключевые слова: вибрация, тросовый виброизолятор, гармонический анализ, моделирование, кварцевый генератор, спектральная плотность вибрации, резонансные частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Использование тросовых виброизоляторов для виброзащиты кварцевых генераторов / В. Н. Кийко [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 63–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70>.

USE OF CABLE VIBRATION ISOLATORS FOR VIBRATION PROTECTION OF QUARTZ GENERATORS

VADIM N. KIYKO, NIKOLAY M. NAUMOVICH, MAKSIM V. DAVYDOV,
VADIM I. ZHURAVLIOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10.03.2023

Abstract. Vibration isolators with damping properties of steel multiwire cables for vibration protection of quartz oscillators have been studied. Modeling of vibration characteristics of structural elements was carried out using numerical methods. The elastic characteristics and design parameters of the cable for the vibration isolator are calculated. A harmonic analysis was carried out with given values of mass and stiffness under the influence of external vibrations. A sample of a cable vibration isolator has been developed and manufactured. To verify the calculated results obtained, the structure of the test bench is proposed, which allows determining the values of natural resonant

frequencies. The study of the dependence of vibration acceleration on the frequency of oscillations with a disturbing effect according to the sinusoidal and random laws with a variable frequency in the range of 10–2000 Hz was carried out. Tests of the cable vibration isolator have shown the effectiveness of vibration suppression for frequencies above 120 Hz. In the lower range of random vibrations, various resonances have a significant effect on each other. The experiments confirmed the simulation results and the effectiveness of the solution used: the difference in indicators in determining the resonant frequencies was less than 10 % with a decrease in the vibration level to a given indicator.

Keywords: vibration, cable vibration isolator, harmonic analysis, simulation, crystal oscillator, vibration spectral density, resonant frequencies.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravliov V. I. (2023) Use of Cable Vibration Isolators for Vibration Protection of Quartz Generators. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 63–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70> (in Russian).

Введение

Динамичное развитие электронных систем и расширение сферы их применения обуславливают рост требований по обеспечению их стабильной работы в условиях действия различных дестабилизирующих факторов. Одной из приоритетных задач является снижение реакции кварцевых генераторов на воздействие вибраций, что обеспечивает улучшение фазовых характеристик задающих генераторов и характеристик радиосистем в целом [1]. Когда кварцевый генератор подвергается случайной вибрации, ускорение может описываться спектральной плотностью мощности [2]. Фазовый шум L , вызванный вибрацией в кварцевом генераторе, определяется следующим образом:

$$L(f) = 20 \log \left[\frac{G \sqrt{2PSD} f_0}{2f_v} \right], \quad (1)$$

где G – чувствительность к ускорению; PSD – спектральная плотность вибрации, $g^2/Гц$; f_0 – резонансная частота кварцевого кристалла без ускорения; f_v – частота вибрации.

Из выражения (1) видно, что фазовый шум практически полностью определяется уровнем внешних вибраций и G -чувствительностью. Данный параметр зависит от конструкции самого генератора, его расположения в модулях разного уровня, от наличия демпфирующих элементов [3]. В качестве внешних элементов системы виброизоляции кварцевых генераторов применимы различные виды виброизолирующих креплений [4]. В статье рассматриваются тросовые виброизоляторы с демпфирующими свойствами стальных тонких многопроволочных тросов. Основные показатели таких изделий – массогабаритные характеристики, жесткости на сдвиг, сжатие и скручивание. Их особенностями являются длительный срок службы, коррозионная стойкость, виброизоляция по всем осям [5]. Для подтверждения эффективности применения тросовых виброизоляторов в конструкциях кварцевых генераторов необходимо исследовать амплитуды колебаний на виброизоляторах, частоты связанных или независимых колебаний, коэффициент затухания колебаний.

Разработка расчетной модели тросового виброизолятора

Моделирование вибрационных характеристик конструктивных элементов виброизолятора проводили с использованием численного метода конечных элементов [6], в основу которого заложены два типа исследований: статический и модальный. При статическом типе выполняются анализ жесткостей моделей виброгасителей или виброизоляторов в различных направлениях, зависящих от упругих или вязкоупругих свойств материалов, а также сопоставление полученных результатов расчета со значениями, определенными производителем в соответствующих каталогах. Модальный тип исследований предназначен для определения собственных форм и частот колебаний, которые, в свою очередь, являются резонансными для каждого виброизолятора. При моделировании решались следующие задачи.

1. Расчет упругих характеристик троса

При работе виброизолятора его конструктивные элементы (тросы) работают в основном на изгиб. Жесткость этих элементов определяется по формуле

$$c = EJ_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала; $J_{\text{тр}}$ – момент инерции троса.

Для определения момента инерции троса с учетом винтообразности составляющих его проволок использовали выражение [7]

$$J_{\text{тр}} = \frac{n\pi}{64} (6d_2^4 / \cos \alpha + d_1^4), \quad (3)$$

где n – число прядей троса; d_2 – диаметр винтовой проволоки троса; α – угол навивки; d_1 – диаметр центральной проволоки.

2. Разработка модели троса для тросового виброизолятора

При анализе вибрационных характеристик в расчетных пакетах программ инженерного анализа зачастую отсутствуют модели тросов, которые заменяются на цельные стержни равного сечения. В рассматриваемом случае целесообразно изменить модуль упругости в соответствии с формулой

$$E_{\text{ст}} J_{\text{ст}} = E_{\text{тр}} J_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{ст}} = 2e^{+11}$ – модуль упругости стали, Па; $J_{\text{ст}} = \frac{\pi d^4}{64}$ – момент инерции стержня круглого сечения диаметром d ; $E_{\text{тр}}$ – модуль упругости стального троса.

С учетом формул (3), (4) $E_{\text{тр}} = 5127676447$ Па. В качестве проверки правильности вычислений сопоставили измеренный изгиб реального троса с его расчетной моделью. На рис. 1 продемонстрирован изгиб реального троса диаметром 0,8 мм с вылетом 100 мм от собственного веса. Величина перемещения консоли от горизонтали составляла 12,5 мм.

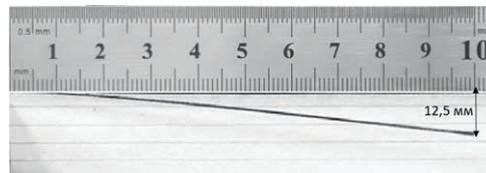


Рис. 1. Изгиб реального троса от собственного веса
Fig. 1. Bending of a real cable due to its own weight

На рис. 2 изображено распределение перемещений расчетной модели троса в виде цельного стержня от собственного веса, но с меньшим, чем у стали, модулем упругости.

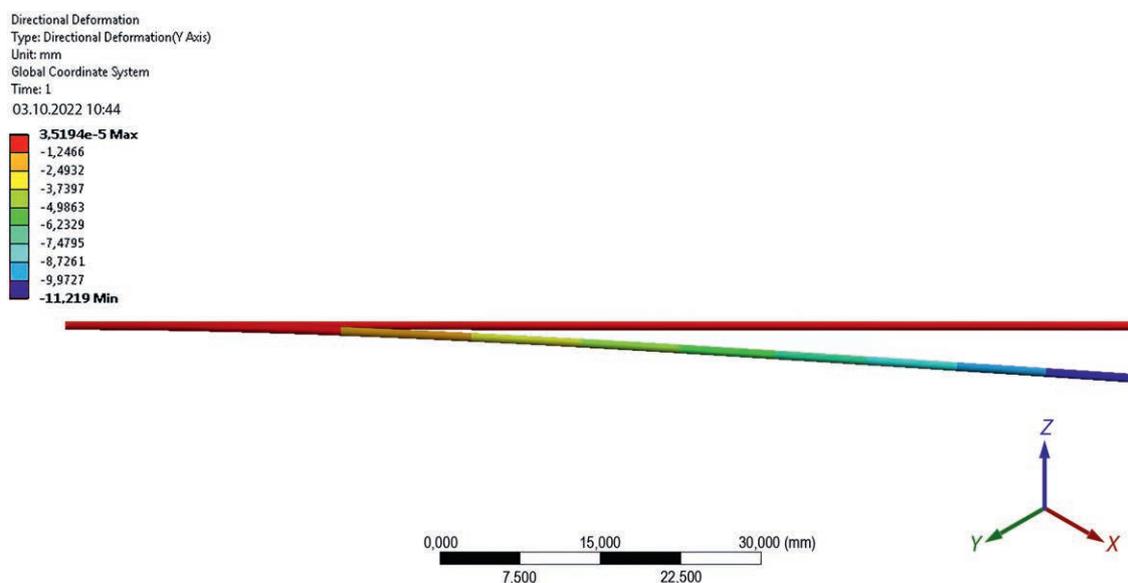


Рис. 2. Распределение перемещений расчетной модели троса в виде цельного стержня от собственного веса
Fig. 2. Distribution of displacements of the design model of a cable in the form of a solid rod from its own weight

Как видно из рис. 1, 2, расчетная модель троса практически совпадает с реальным тросом (отклонение составило 11,219 мм, расхождение результатов – менее 12 %), что позволяет использовать данную модель в дальнейших оценках. Для натурных испытаний был изготовлен макет тросового восьмиветвевового виброизолятора с углом каждой ветви 0° относительно плоскости нижней шайбы-держателя, диаметр троса – 0,8 мм (далее – ВИ 0,8/0) (рис. 3).

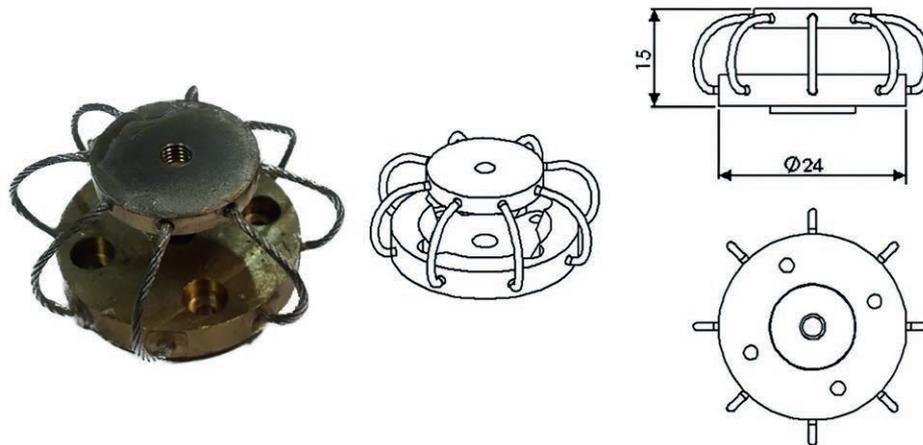


Рис. 3. Макет и разрез тросового восьмиветвевового виброизолятора ВИ 0,8/0
Fig. 3. Layout and section of a cable eight-branch vibration isolator VI 0.8/0

В качестве материала шайб-держателей тросов использовалась латунь ЛС59-1, тросы – из нержавеющей стали 03Х17Н14М3 (aisi 316L) двойной навивки 7×7 и диаметром 0,8 мм. Для фиксации тросов в шайбах-держателях применяли цианакрилатный клей LOCTITE 406. Сборку виброизолятора осуществляли с помощью кондуктора, состоящего из шпильки и трех фиксирующих гаек, которыми шайбы-держатели закреплялись в требуемом положении. Тросы вклеивали в шайбы-держатели, предварительно смонтированные на кондукторе.

Для выполнения экспериментальных исследований разработали расчетную модель, включающую один тросовый виброизолятор и установленный на нем вибропреобразователь (рис. 4). Назначение вибропреобразователя заключается в генерировании электрического сигнала пропорционального механическим колебаниям. Все массо-инерционные характеристики твердотельной модели были приведены в соответствие реальным объектам.

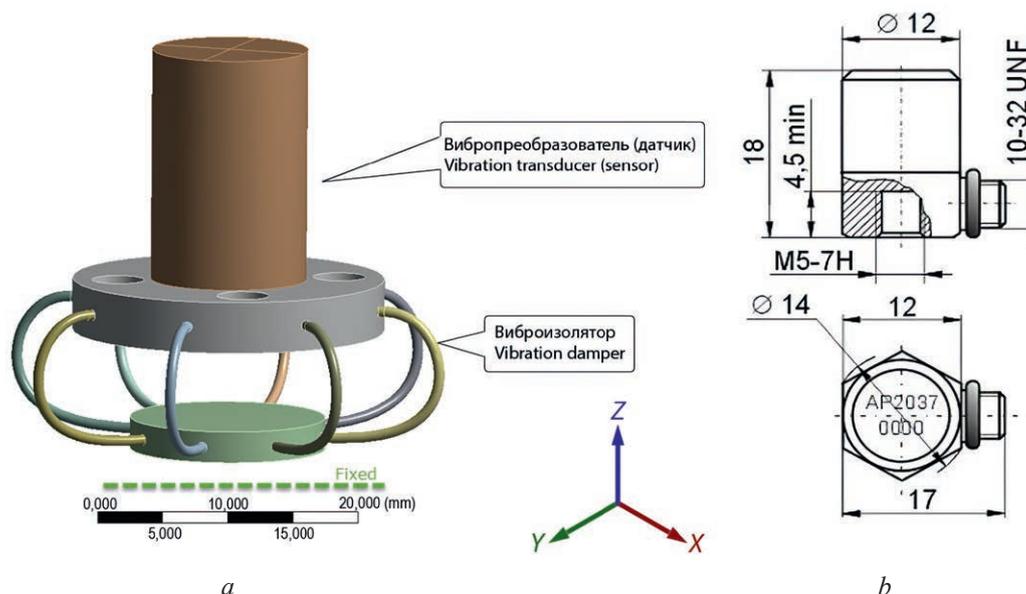


Рис. 4. Модель виброизолятора с установленным на нем вибропреобразователем (a) и разрез вибропреобразователя (b)
Fig. 4. Vibration isolator model with a vibration transducer installed on it (a) and section of the vibration transducer (b)

Результаты моделирования

Компьютерное моделирование виброизолятора проводили с использованием трех видов исследований:

- статического анализа (позволяет сформировать начальное положение, образованное деформированием упругих элементов от собственного веса конструкции);
- модального анализа (позволяет получить значения собственных частот конструкции);
- анализа случайных вибраций (позволяет получить графическую зависимость спектральной плотности сигнала от частоты колебаний).

На рис. 5 представлен полученный методом конечных элементов статический прогиб от собственного веса конструкции виброизолятора с вибропреобразователем, а на рис. 6 – первые четыре формы изгиба и значения собственных частот виброизолятора.

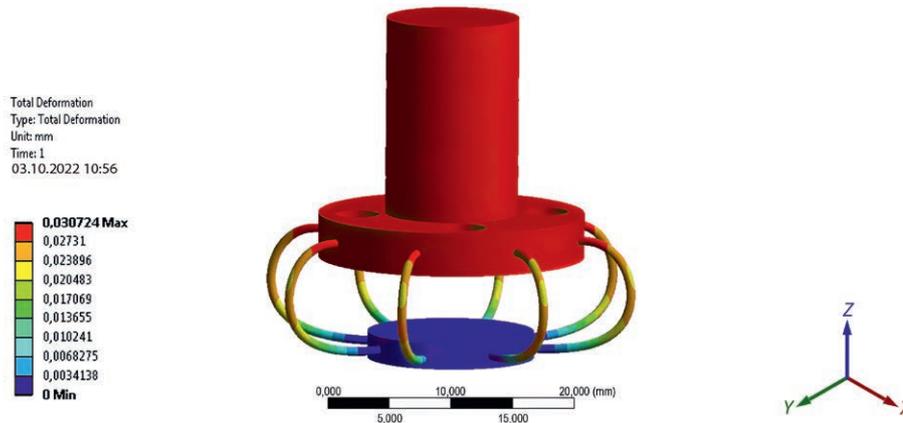


Рис. 5. Статический прогиб от собственного веса конструкции виброизолятора с вибропреобразователем
Fig. 5. Static deflection due to own weight of a vibration isolator structure with a vibration transducer

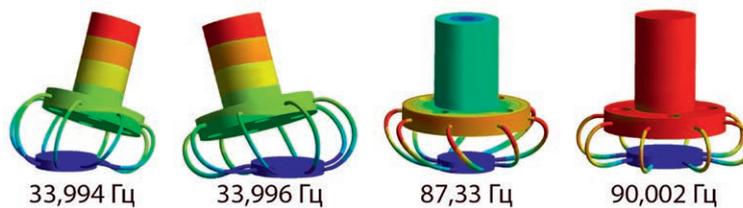


Рис. 6. Формы изгиба и значения собственных частот виброизолятора
Fig. 6. Bending forms and natural frequencies of the vibration isolator

При модальных испытаниях одновременно возбуждается лишь один резонанс, поэтому нет взаимного влияния резонансов друг на друга. Анализ случайных вибраций необходим с точки зрения испытаний, наиболее приближенных к реальным условиям. Преимущество исследования с помощью метода случайных вибраций – достаточно короткое время испытательного воздействия вследствие одновременного возбуждения всех резонансов.

В качестве возмущающего воздействия при анализе случайных вибраций задавали PSD от частоты колебаний в виде, изображенном на рис. 7. Зависимость PSD от частоты колебаний – это получение возмущающего воздействия как при компьютерном моделировании, так и для натурных испытаний.

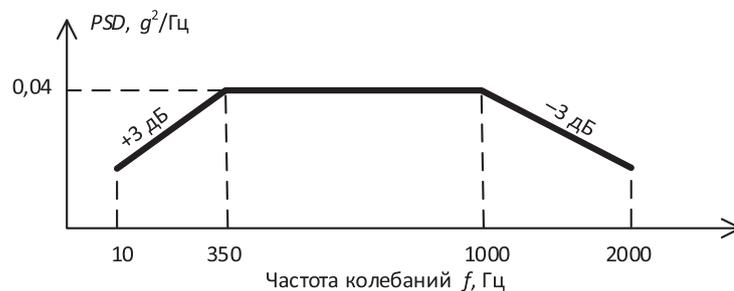


Рис. 7. Вибрационное возмущающее воздействие
Fig. 7. Vibration disturbance

На рис. 7 в диапазоне частот вибраций 300–1000 Гц спектральная плотность вибраций постоянна и равна $0,04 \text{ g}^2/\text{Гц}$. На частотах менее 300 и более 1000 Гц спектральная плотность вибраций изменяется по закону 3 дБ/октаву.

На рис. 8 представлена смоделированная зависимость PSD вдоль вертикальной оси Z (рис. 5) от частоты колебаний, которая является откликом на возмущающее воздействие при компьютерном моделировании.

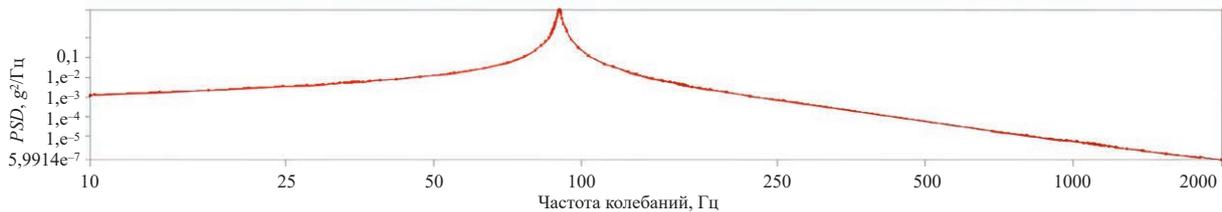


Рис. 8. Результат моделирования зависимости PSD от частоты колебаний
Fig. 8. The result of modeling the dependence of PSD on the oscillation frequency

Экспериментальные исследования

Проверку расчетных данных осуществляли в процессе экспериментов. Для определения собственных резонансных частот тросового виброизолятора провели его испытания на вибростенде TIRA TV 5220/LS120 с системой управления BC-207 (рис. 9).

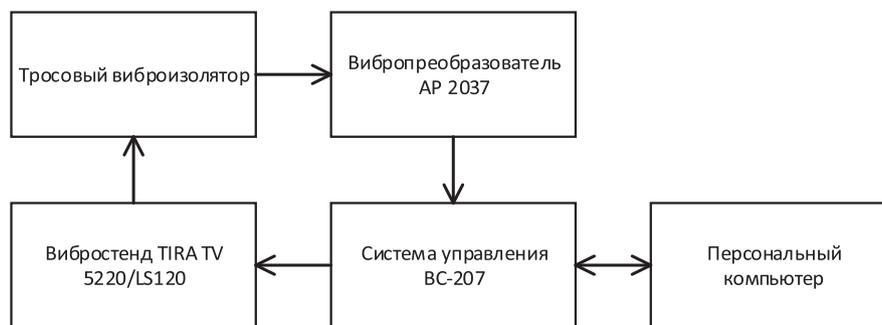


Рис. 9. Схема установки для определения собственных резонансных частот
Fig. 9. Installation scheme for determining natural resonant frequencies

На рис. 10 приведены результаты исследования зависимости виброускорения (в единицах g) от частоты колебаний при испытаниях виброизолятора.

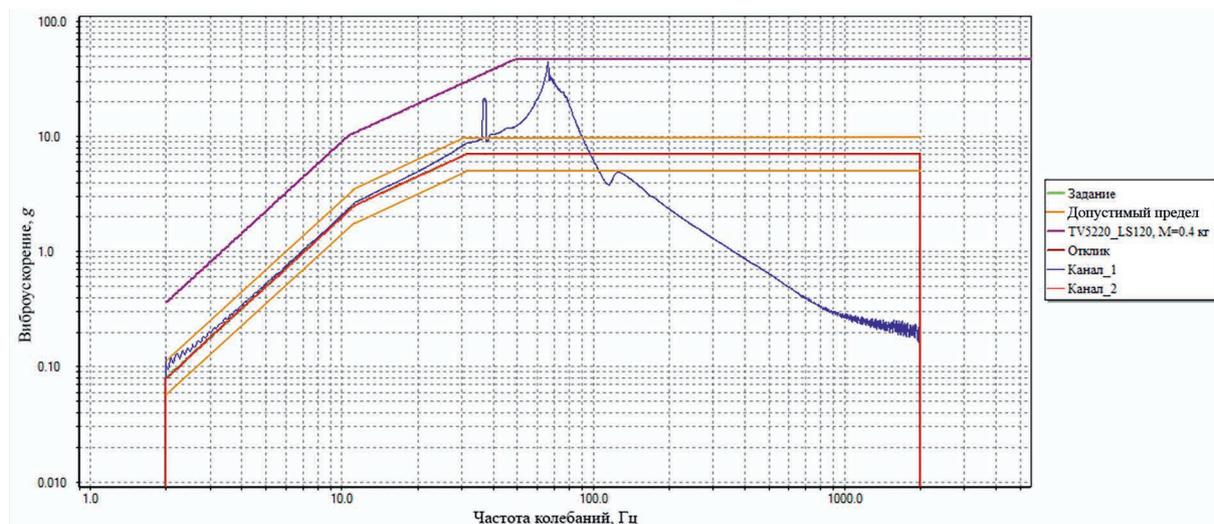


Рис. 10. Зависимость виброускорения от частоты колебаний при испытаниях виброизолятора
Fig. 10. Dependence of vibration acceleration on the frequency of oscillations when testing a vibration isolator

На графике рис. 10 значениям, получаемым с вибропреобразователя, соответствует синяя кривая (Канал_1), по которой видно, что возмущающее воздействие изменяется по синусоидальному закону с частотой колебаний в диапазоне 10–2000 Гц. Как видно из рис. 10 (синяя кривая, Канал_1), на всем диапазоне частот наблюдаются два пика виброускорения, превышающих допустимый предел (желтые кривые). Значения частот для данных резонансов соответствуют собственным частотам виброизолятора (рис. 6), рассчитанным методом конечных элементов. В процессе испытаний виброизолятора получены зависимости PSD от частоты колебаний (Канал_1) (рис. 11) вдоль вертикальной оси Z (рис. 5).

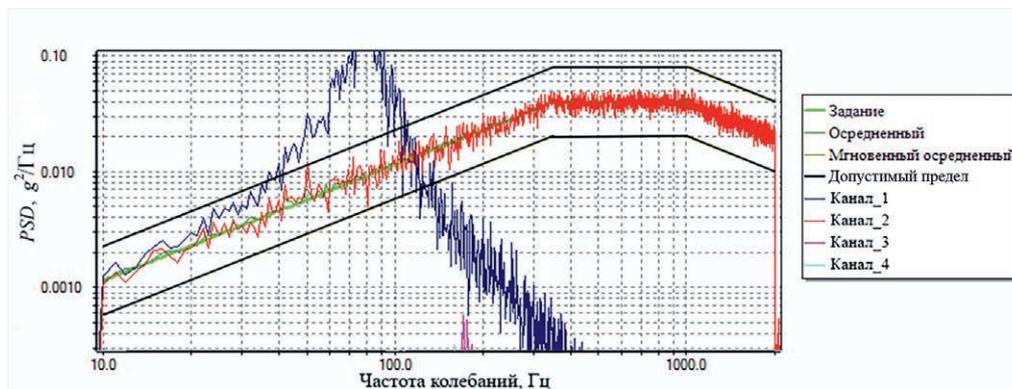


Рис. 11. Зависимость PSD от частоты колебаний при испытаниях виброизолятора
Fig. 11. Dependence of PSD from the frequency of vibrations during testing of a vibration isolator

Согласно рис. 8, 11, максимальное значение PSD , передаваемое на вибропреобразователь вдоль оси Z , находится в диапазоне 80–90 Гц, полученном как по результатам моделирования, так и при проведении экспериментов.

Выводы

1. Компьютерное моделирование и натурные испытания тросового виброизолятора ВИ 0,8/0 показали сопоставимость результатов: разность результатов при определении резонансных частот составила менее 10 %. Определено, что тросовые виброизоляторы ВИ 0,8/0 эффективны для частот вибраций более 120 Гц. В диапазоне до 120 Гц они не позволяют обеспечить подавление вибраций. Более того, при случайных вибрациях есть общий подъем уровня спектральной плотности вибрации, что обусловлено влиянием различных резонансов друг на друга.

2. Зная величины резонансных частот, следует предпринять дополнительные меры для снижения уровней вибрации на защищаемом кварцевом генераторе при использовании тросовых виброизоляторов. Оптимально предусмотреть моделирование системы, состоящей из нужного количества виброизоляторов (определяется техническими требованиями – направлением воздействия на изделие и необходимостью компенсации этих воздействий, габаритами изделия) и кварцевого генератора.

Список литературы

1. Optimizing Phase-Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator / A. Apte [et al.] // IEEE Microwave Magazine. 2017. Vol. 18, No 4. P. 108–123.
2. Filler, R. L. The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: a Review / R. L. Filler // IEEE Transactions on UFFC. 1988. Vol. 35. P. 297–305.
3. Динамика кварцевого генератора в условиях внешней вибрации / А. М. Гуськов [и др.]. Ижевск: Ижевский ин-т компьютер. исслед., 2014. 202 с.
4. Ильинский, В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. М.: Радио и связь, 1982. С. 260.
5. Гармонический анализ тросовых виброизоляторов для синтезаторов частот / В. И. Журавлев [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022): матер. III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т, 2022. С. 203–206.
6. Kurowski, P. Chapter 11: Vibration Analysis, in Finite Element Analysis for Design Engineers / P. Kurowski // SAE. 2017. P. 181–196.

7. Пономарев, Ю. К. Разработка методики расчета характеристик тросового виброизолятора с радиусным и прямолинейными участками осевой линии / Ю. К. Пономарев, П. В. Посохов, О. Б. Симаков // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Брянск: Брянский госуд. инж.-технол. ун-т, 2014. Вып. 20. С. 64–74.

References

1. Apte A., Rohde U. L., Poddar A., Rudolph M. (2017) Optimizing Phase-Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator. *IEEE Microwave Magazine*. 18 (4), 108–123.
2. Filler R. L. (1988) The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: a Review. *IEEE Transactions on UFFC*. 35, 297–305.
3. Guskov A. M. et al. (2014) *Dynamics of a Quartz Oscillator under External Vibration*. Izhevsk, Izhevsk Institute for Computer Research. 202 (in Russian).
4. Ilyinsky V. S. (1982) *Protection of REA and Precision Equipment from Dynamic Impacts*. Moscow, Radio and Communication. 260 (in Russian).
5. Zhuravliov V. I., Naumovich N. M., Stezhko I. K., Kiyko V. N. (2022) Harmonic Analysis of Cable Vibration Isolators for Frequency Synthesizers. *Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2022), Materials of the III Intern. Scientific-Practical. Conf., Minsk, Apr 21–22, 2022*. Minsk, Belarusian State University. 203–206 (in Russian).
6. Kurowski P. (2017) Chapter 11: Vibration Analysis, in *Finite Element Analysis for Design Engineers*. SAE. 181–196.
7. Ponomarev Yu. K., Posokhov P. V., Simakov O. B. (2014) Development of a Method for Calculating the Characteristics of a Cable Vibration Isolator with Radius and Straight Sections of the Center Line. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Sat. Scientific Works*. 20. Bryansk: Bryansk State Engineering and Technology University. 64–74 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кийко В. Н., аспирант, ст. преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Наумович Н. М., к. т. н., начальник научно-конструкторского центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (Центр 1.6) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Давыдов М. В., к. т. н., проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Журавлёв В. И., к. т. н., ст. н. с. Центра 1.6 научно-исследовательской части, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 337-77-19
E-mail: kiyko@bsuir.by
Кийко Вадим Николаевич

Information about the authors

Kiyko V. N., Postgraduate, Senior Lecturer at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Naumovich N. M., Cand. of Sci., Head of the Research and Design Center of Advanced Radioelectronic Systems of the Centimeter and Millimeter Wavelengths (Center 1.6) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Davydov M. V., Cand. of Sci., Vice-Rector for Academic Affairs of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Zhuravliov V. I., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 1.6 of R&D Department, Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 337-77-19
E-mail: kiyko@bsuir.by
Kiyko Vadim Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-71-75>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.794.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ СВОЙСТВ ГРАФЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО АТОМАМИ ФТОРА

В. Н. МИЩЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Приведены результаты моделирования свойств графена, модифицированного атомами фтора. Создание современных полупроводниковых приборов требует внедрения новых материалов. Графен – один из них, вызывающий интерес исследователей. Добавление атомов фтора, водорода и других химических элементов в графен позволяет создавать его модификации. На этой основе можно разрабатывать полупроводниковые приборы и устройства с улучшенными выходными характеристиками. Путем моделирования из первых принципов получены основные характеристики модификации графена с использованием атомов фтора, а именно – зонная диаграмма, зависимости плотности состояния (параметр DOS) электронов и дырок от энергии. При итерационном решении транспортного уравнения Больцмана определены зависимости подвижности носителей заряда от температуры. Полученные зависимости и параметры фторированного графена могут служить основой для создания новых гетероструктурных приборов, содержащих слои модифицированного графена и других полупроводниковых материалов.

Ключевые слова: графен, фтор, моделирование, зонная диаграмма, полупроводниковая структура.

Для цитирования. Мищенко, В. Н. Моделирование из первых принципов свойств графена, модифицированного атомами фтора / В. Н. Мищенко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 71–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-71-75>.

FIRST-PRINCIPLES MODELLING OF THE PROPERTIES OF GRAPHENE MODIFIED WITH FLUORINE ATOMS

VALERY N. MISHCHANKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15.02.2023

Abstract. The results of modeling the properties of graphene modified with fluorine atoms are presented. The creation of modern semiconductor devices requires the introduction of new materials. Graphene is one of them that is of interest to researchers. The addition of fluorine, hydrogen, and other chemical elements to graphene makes it possible to create its modifications. On this basis, it is possible to develop semiconductor devices and devices with improved output characteristics. The basic characteristics of graphene modification with the use of fluorine atoms, namely, the band diagram, the dependences of the density of state (DOS parameter) of electrons and holes on the energy value, were obtained by first-principles modeling. The dependences of charge carrier mobility on temperature are determined for the iterative solution of the Boltzmann transport equation. The dependences and parameters obtained for fluorinated graphene can serve as a basis for creating new heterostructural devices containing layers of modified graphene and other semiconductor materials.

Keywords: graphene, fluorine, modeling, zone diagram, semiconductor structure.

For citation. Mishchanka V. N. (2023) First-Principles Modelling of the Properties of Graphene Modified with Fluorine Atoms. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 71–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-71-75> (in Russian).

Введение

Графен стал объектом многочисленных исследований благодаря своим особым механическим, электрическим и иным свойствам [1]. Однако его применение в полупроводниковой электронике показывает, что существуют проблемы, связанные с отсутствием зазора между валентной зоной и зоной проводимости. Возможности модификации графена с использованием атомов фтора, водорода и других химических элементов стали предметом исследования как возможное решение этой проблемы [2–4]. Графен, модифицированный атомами фтора, – это соединение, состоящее из двумерного графена, ковалентно связанного с атомами фтора. Полученный таким образом материал представляет собой перспективную основу для фундаментальных исследований и возможных технологических приложений при создании электронных приборов. Исследованы параметры и характеристики фторированного графена с использованием моделирования из первых принципов (*ab initio* метод).

Метод и особенности моделирования свойств фторированного графена

Моделирование из первых принципов выполняли с помощью программных комплексов Quantum Espresso [5] и EPW [6], используя параметризацию Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) и обобщенное градиентное приближение вида GGA. Параметры моделирования были следующими: энергия отсечки волновой функции – 60 Ry (1 Ry \approx 13,605 эВ), энергия отсечки плотности заряда и потенциалов – 240 Ry, зона Бриллюэна представлена с помощью сетки Монкхорста-Пака размерами $12 \times 12 \times 1$. Для устранения возможных паразитных осцилляций энергии при выполнении моделирования к рассматриваемой структуре сверху и снизу добавлялись слои вакуума, каждый толщиной 20 бор (1 бор \approx $5,29 \cdot 10^{-11}$ м).

Первоначально с использованием Quantum Espresso выполняли итерационные процедуры, целью которых было определение параметров элементарной ячейки для описания исследуемой структуры. В процессе моделирования уточняли координаты атомов углерода и фтора, значения постоянной кристалла и ряд других параметров с помощью подпрограмм *vc-relax* и *vc*, входящих в *pw* программного комплекса Quantum Espresso. Этап работ, связанный с самосогласованным и не-самосогласованным моделированием с помощью подпрограмм *scf* и *nscf* соответственно позволил получить зонную диаграмму данного материала. На рис. 1, *a* показаны особенности расположения атомов углерода C и фтора F для 100%-но фторированного графена типа C_2F_2 .

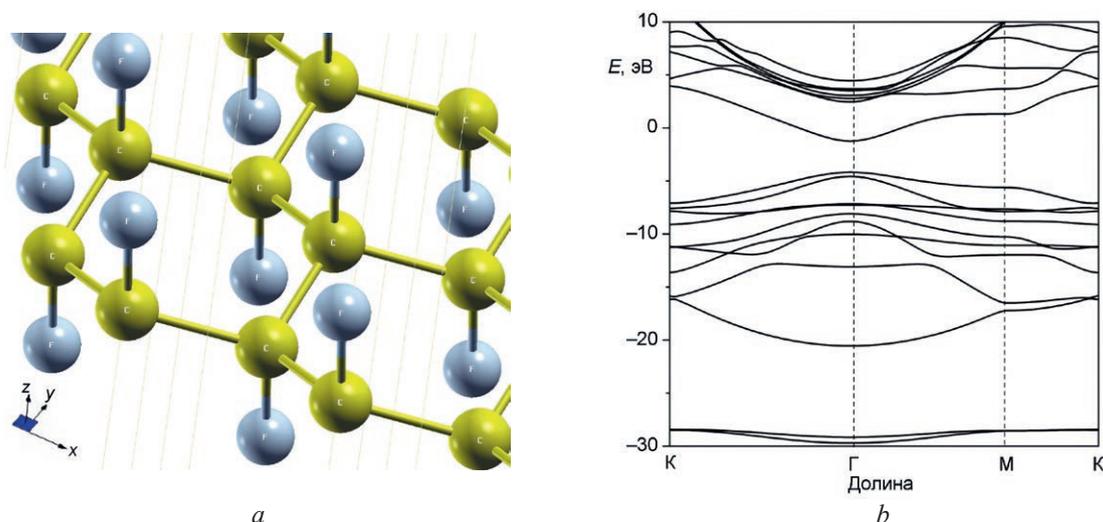


Рис. 1. Особенности расположения атомов углерода C и фтора F (*a*) и зонная диаграмма (*b*) для структуры 100%-но фторированного графена типа C_2F_2
Fig. 1. Peculiarities of arrangement of carbon C and fluorine F atoms (*a*) and zone diagram (*b*) for 100 % fluorinated graphene structure of C_2F_2 type

Для расчета зависимости подвижности носителей заряда от величины энергии использовали программный комплекс EPW [6]. Чтобы установить зависимость величины подвижности носителей заряда от параметров моделирования, их значения выбирали из специальных диапазонов. Так, размер сеток вида $N \times N \times 1$ для электронов и дырок при интерполяции определялся значением параметра N , величина которого изменялась от 80 до 216. Значение коэффициента сглаживания по Гауссу (dg) изменялось от 0 (специальный режим адаптивного сглаживания) до 0,1 эВ. Параметр $fsthick$, определяющий величину диапазона энергий при моделировании относительно уровня энергий Ферми, изменялся в пределах 2,5–10,0 эВ. Количество функций Ванье (Wannier) при интерполировании принималось равным 12. При моделировании в программном комплексе EPW использовали режим установки параметров `auto_projection` и `scdm_proj` в положение `true`. Значение концентрации электронов и дырок для всех результатов моделирования составляло $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Величину подвижности носителей заряда, обусловленную рассеиванием фононов, находили через итерационное решение транспортного уравнения Больцмана, процедура которого реализовывалась в EPW [6] по формуле согласно [7, 8]

$$\mu_{\alpha\beta} = \frac{-1}{V_{uc} n_c} \sum_n \int \frac{d^3 k}{\Omega_{BZ}} v_{nk\alpha} \partial_{E_\beta} f_{nk}, \quad (1)$$

где α, β – параметры, указывающие на использование трех декартовых координат; $\partial_{E_\beta} f_{nk} \equiv \partial f_{nk} / \partial E_\beta |_{E=0}$ – линейное изменение электронной функции занятости f_{nk} при изменении электрического поля E ; V_{uc} – объем элементарной ячейки; Ω_{BZ} – объем первой зоны Бриллюэна; \mathbf{k} – импульс носителей заряда.

Скорость носителей заряда для состояния ε_{nk} и концентрацию носителей заряда определяли из соответствующих уравнений [8]:

$$v_{nk\alpha} = \hbar^{-1} \partial \varepsilon_{nk} / \partial k_\alpha; \quad (2)$$

$$n_c = (1/V_{uc}) \sum_n \int (d^3 k / \Omega_{BZ}) f_{nk}^0, \quad (3)$$

где \hbar – редуцированная постоянная Планка; f_{nk}^0 – распределение Ферми-Дирака, определяемое при равновесном состоянии в отсутствие внешнего поля.

Результаты моделирования из первых принципов параметров и характеристик фторированного графена

На рис. 1, *b* показана полученная путем моделирования зонная диаграмма 100%-но фторированного графена типа C_2F_2 . Как видно из рисунка, фторированный графен типа C_2F_2 представляет собой прямозонный полупроводник и характеризуется для долины Γ минимальным энергетическим зазором между валентной зоной и зоной проводимости, величина которого составляет $\sim 3,0$ эВ. Результаты моделирования находятся в хорошем соответствии с результатами экспериментальных исследований, представленных в [4]. Полученное значение зазора сопоставимо с его величиной между валентной зоной и зоной проводимости для долины Γ для материала C_2H_2 [9].

Выполнены исследования влияния параметров моделирования на величину подвижности носителей заряда. Предварительные результаты моделирования показали, что при изменении параметра $fsthick$ от 2,5 до 10,0 эВ величина подвижности менялась незначительно, поэтому в последующих расчетах ее значение принималось равным 3,0 эВ. На рис. 2, *a* изображены зависимости плотности состояния (DOS) электронов и дырок от энергии E , на рис. 2, *b* – демонстрируется влияние параметров моделирования N на подвижность электронов μ при температуре $T = 300$ К.

На рис. 2, *b* кривые 1, 2 получены для электронов, а 3, 4 – для дырок. Кривые 1 и 4 соответствуют расчетам при выборе направления вдоль условной координаты x , а 2 и 3 – вдоль y . Для расчета кривых, представленных на рис. 2, *b*, параметр dg принимался равным 0,01 эВ.

На рис. 3, *a* приведены зависимости подвижности носителей заряда μ от параметра dg . Кривые 1, 2 получены для дырок, а 3, 4 – для электронов. При этом кривые 2 и 3 соответствуют расчетам при выборе направления вдоль условной координаты x , а 1 и 4 – вдоль y .

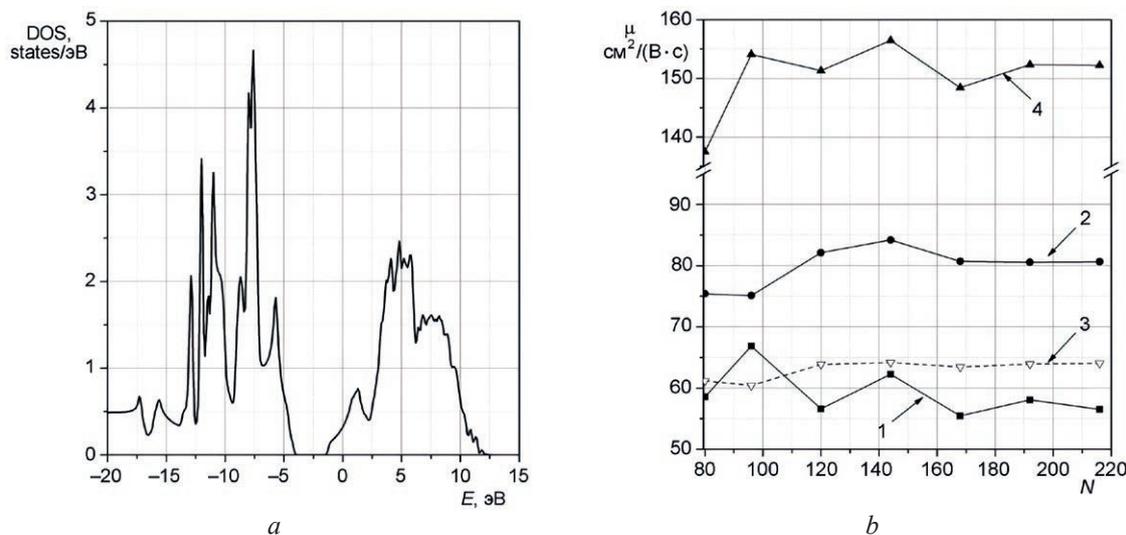


Рис. 2. Зависимости плотности состояния электронов и дырок DOS от энергии E (a) и подвижности электронов μ от размера сетки вида $N \times N \times 1$ (b)
Fig. 2. Dependences of the density of state of electrons and holes DOS on the energy value E (a) and mobility of electrons μ on the grid size of the form $N \times N \times 1$ (b)

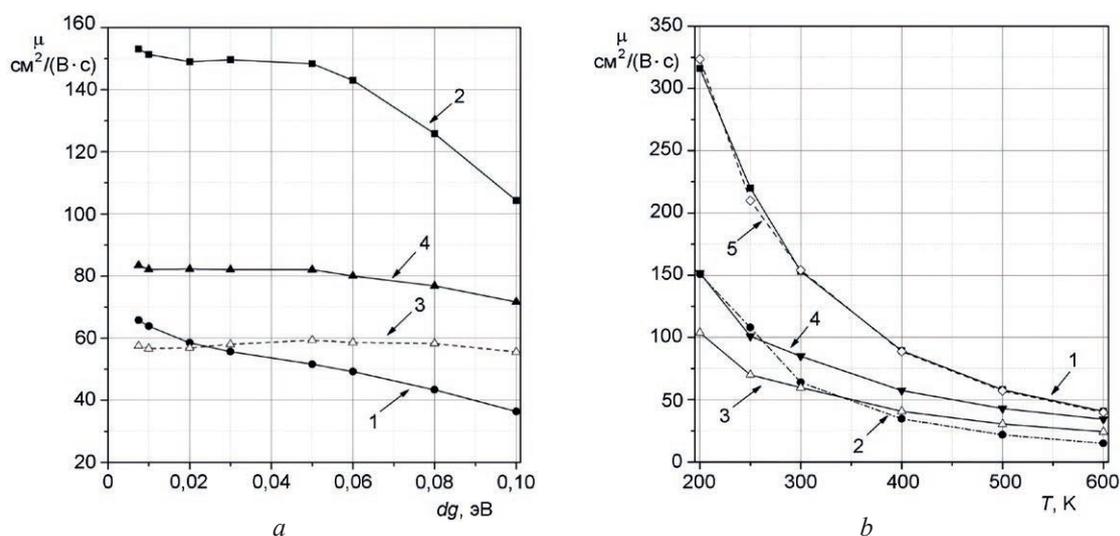


Рис. 3. Зависимости подвижности носителей заряда от параметра dg (a) и температуры T (b)
Fig. 3. Dependences of the mobility of charge on the parameter dg (a) and on the temperature T (b)

На рис. 3, *b* показаны зависимости подвижности носителей заряда от температуры T . Здесь кривые 1–4 получены при $N = 156$, а кривая 5 – при $N = 96$: для всех кривых параметр dg принимался равным 0,01 эВ. Кривые 1, 2 на рис. 3, *b* получены для дырок, а 3, 4 – для электронов. Кривые 1 и 3 соответствуют расчетам при выборе направления вдоль условной координаты x , а 2 и 4 – вдоль y .

Для фторированного графена согласно рис. 3, *b*, наблюдается монотонное уменьшение подвижности электронов с ростом температуры, что обычно имеет место в других полупроводниковых материалах. Кроме того, следует обратить внимание на существенно разные величины подвижности дырок вдоль условных направлений координат x и y . При $T = 300$ К подвижность дырок вдоль x приблизительно в 2,5 раза превышает аналогичное ее значение вдоль y , а также значительно больше подвижности вдоль осей x и y для электронов. При температуре выше 500 К разница между значениями подвижности электронов и дырок становится незначительной.

Заключение

1. Приведены результаты исследования свойств и характеристик фторированного графена типа C_2F_2 . Путем моделирования из первых принципов получены основные характеристики этой модификации графена с использованием атомов фтора, а именно – зонная диаграмма, а также зависимости плотности состояния электронов и дырок от энергии.

2. Путем итерационного решения транспортного уравнения Больцмана определены зависимости подвижности носителей заряда от температуры. Полученные зависимости и параметры фторированного графена могут служить основой для создания новых гетероструктурных приборов, содержащих слои графена и других полупроводниковых материалов.

Список литературы / References

1. Novoselov K. S., Geim A. K. et al. (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Film. *Science*. 306, 666–669.
2. Leenaerts O., Peelaers H., Hernández-Nieves A. D., Partoens B., Peeters F. M., Leenaerts O., Peelaers H., Hernández-Nieves A. D., Partoens B., Peeters F. M. (2010) First-Principles Investigation of Graphene Fluoride and Graphane. *Phys. Rev. B* 82, 195436.
3. Karlický F., Zbořil R., Otyepka M., Bourlinos A. B., Steriotis T. A., Stubos A. K., Georgakilas V., Šafářová K., Jančík D., Trapalis C., Otyepka M. (2012) Graphene Fluoride: a Stable Stoichiometric Graphene Derivative and its Chemical Conversion to Graphene. *Small*. 6, 2885–2891.
4. Nair R. R., Ren W. C., Jalil R., Riaz I., Kravets V. G., Britnell L., Blake P., Schedin F., Mayorov A. S., Yuan S. M., Katsnelson I. H., Cheng M., Strupinski W., Bulusheva L. G., Okotrub A. V., Grigorieva I. V., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Geim A. K. (2010) Fluorographene: Two Dimensional Counterpart of Teflon. *Small*. 6, 2877–2884.
5. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., Ceresoli D., Chiarotti G. L., Cococcioni M., Dabo I. et al. (2009) Quantum Espresso: a Modular and Open-Source Software Project for Quantum Simulations of Materials. *J. Phys.: Condens. Matter*. 21, 395502.
6. Poncé S., Margine E. R., Verdi C. (2016) EPW: Electron-Phonon Coupling, Transport and Superconducting Properties Using Maximally Localized Wannier Functions. *Computer Physics Communications*. 209, 116–133.
7. Poncé S., Li W., Reichardt S., Giustino F. (2020) First-Principles Calculations of Charge Carrier Mobility and Conductivity in Bulk Semiconductors and Two-Dimensional Materials. *Rep. Prog. Phys.* 83, 036501.
8. Poncé S., Macheda F., Margine E. R., Marzari N., Bonini N., Giustino F. (2021) First-Principles Predictions of Hall and Drift Mobilities in Semiconductors. *Physical Review Research*. 3, 043022.
9. Murav'ev V., Mishchanka V. (2021) Ab-Initio Simulation of Hydrogenated Graphene Properties. *Doklady BGUIR*. 19 (8), 5–8 (in Russian).

Сведения об авторе

Мищенко В. Н., к. т. н., доцент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 394-55-58
E-mail: mishchenko@bsuir.by
Мищенко Валерий Николаевич

Information about the author

Mishchanka V. N., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 394-55-58
E-mail: mishchenko@bsuir.by
Mishchanka Valery Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-76-83>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.142.2

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ УСЛОВНОЙ НЕЧЕТКОЙ МЕРЫ

О. В. ГЕРМАН, Ю. О. ГЕРМАН, С. А. МИГАЛЕВИЧ, М. В. КУЗНЕЦОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 21.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрено применение условной логической формулы трехзначного исчисления в системе принятия решений. Такая формула дает возможность определения на ее основе условной нечеткой меры, что связано со следующими положительными моментами. Во-первых, отпадает необходимость в экспертном оценивании нечеткой меры истинности заключения для нечетких посылок, что уменьшает степень субъективности и устраняет необходимость обеспечения полноты статистических данных, а также обоснование полноты. Во-вторых, предлагаемый вариант вычисления условных заключений сравнительно просто допускает многопосылочный случай и возможность оценивать важность посылок на основе их приоритетов (в классических подходах типа Мамдани посылки не различаются по степени их важности для заключений). В-третьих, нет необходимости оценивать степень истинности самих правил для нечетких заключений. Указанные достоинства упрощают практическое использование и, в конечном итоге, повышают качество принимаемых решений, особенно в случае большого числа входных посылок (например, исчисляемого десятками). Приводится пример практического использования развиваемого на основе нечеткой условной меры подхода для принятия решений о коррекции процесса обучения по результатам тестирования.

Ключевые слова: принятие решений, нечеткая логика, правила вывода, мера истинности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Принятие решений на основе условной нечеткой меры / О. В. Герман [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-76-83>.

DECISION-MAKING BASED ON A CONDITIONAL FUZZY MEASURE

OLEG V. GERMAN, JULIA O. GERMAN, SERGEY A. MIGALEVICH,
MIKHAIL V. KUZNETSOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.01.2023

Abstract. The application of a conditional logical formula of three-valued calculus in the decision-making system is considered. A conditional logical formula makes it possible to determine a conditional fuzzy measure on its basis, which is associated with the following positive aspects. First, there is no need for expert evaluation of the fuzzy measure of the truth of the conclusion for fuzzy premises, which reduces the degree of subjectivity and eliminates the need to ensure the completeness of statistical data, as well as the justification of completeness. Secondly, the proposed version of calculating conditional conclusions relatively simply allows for a multi-premise case and the ability to evaluate the importance of premises based on their priorities (in classical approaches like Mamdani, premises do not differ in their degree of importance for conclusions). Thirdly, there is no need

to evaluate the degree of truth of the rules themselves for fuzzy conclusions. These advantages simplify practical use and ultimately improve the quality of decisions made, especially in the case of a large number of inputs (for example, numbered in tens). An example of the practical use of the approach developed on the basis of a fuzzy conditional measure for making decisions about the correction of the learning process based on the testing results is given.

Keywords: decision making, fuzzy logic, inference rules, measure of truth.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. German O. V., German Ju. O., Migalevich S. A., Kuznetsov M. V. (2023) Decision-Making Based on a Conditional Fuzzy Measure. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-76-83> (in Russian).

Введение

В [1] введено и аксиоматизировано понятие условной логической формулы трехзначного исчисления. На базе этой формулы предложено выражение для условной нечеткой меры и показано, как его использовать при принятии решений. Имеется несколько альтернативных позиций для сравнения, которые основываются на рассмотрении формулы нечеткого заключения из нечетких посылок. Например, можно указать подходы Е. Мамдани [2], Т. Тэрано с соавторами [3], П. М. Ларсена [4] и др. Эти подходы используют нечеткие меры заключения правил, что, с одной стороны, делает их более универсальными, но, с другой, оставляет проблему определения этих самых нечетких мер заключения. В [5] рассматривается аналог формулы Байеса для логики возможностей. При наличии статистически значимой корреляции между входными признаками общее заключение может быть далеким от истины. Наконец, имеется также проблема, связанная с недостоверностью самих правил нечеткого заключения, которая в методах авторов [2–4] не рассматривается. Это замечание также указывает на некоторую ограниченность [2–5].

В статье описанные проблемы решались следующим образом. Во-первых, использование нечеткого аналога условной формулы, введенной в [1], избавляет от необходимости вводить степень истинности заключения для правил, поскольку она вычисляется. Во-вторых, рассматриваемый подход позволяет решить проблему взаимной (не)зависимости входных признаков, основываясь на предлагаемой схеме вычислений степени истинности заключений.

Условная формула и условная нечеткая мера

Определение. Формула $\{a|b\}$ – это условная трехзначная формула, значения которой определяются в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Значения формулы $\{a|b\}$
Table 1. Values of the formula $\{a|b\}$

a	b	$a b$
0	0	0
0	1	0
0	*	0
1	0	*
1	1	1
1	*	*
*	0	*
*	1	*
*	*	*

Таким образом, семантика формулы $\{a|b\}$ такова: она принимает значение формулы a всякий раз, когда b истинна; значение «ложь», если ложна a ; значение «не определена» во всех других случаях. Табл. 1 не допускает редукции к классическому двузначному исчислению из-за неопределенности значения $\{a|b\}$ при $a = 1$ и $b = 0$. С помощью табл. 1 истинности условной формулы можно показать, что

$$\{a|b\} \& \{a|d\} = \{a|b \& d\}. \quad (1)$$

Обобщая на непрерывный случай, имеем следующее определение [1]:

$$\mu(a|b) = \begin{cases} 0, & \mu(a) = 0; \\ 0,5, & 0 < \mu(b) \leq 0,5; \\ (2\mu(a) - 1)\mu(b) + 1 - \mu(a), & \mu(b) > 0,5. \end{cases} \quad (2)$$

Это определение наглядно иллюстрирует рис. 1, где $\mu(a|b) = \mu(a)$ при $\mu(b) = 1,0$. На оси ординат откладываются значения условной формулы $\mu(a|b)$ (жирная ломаная линия).

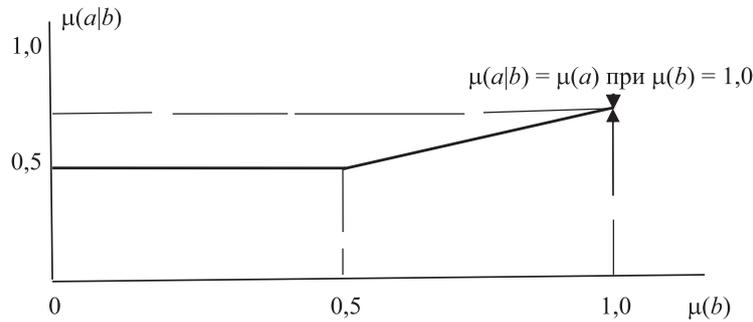


Рис. 1. Графическое представление условной нечеткой меры $\mu(a|b)$
Fig. 1. Graphic representation of the conditional fuzzy measure $\mu(a|b)$

Многоссылочная свёртка

Обратимся к правой (после знака равенства) части формулы (1). В случае нечетких посылок b и d в силу аксиоматики Л. Заде [6] имеем

$$\mu(b \& d) = \min(\mu(b), \mu(d)). \quad (3)$$

Недостаток выражения (3) состоит в том, что «вклад» посылок не дифференцируется. На практике одни посылки считаются более важными, другие – нет. Таким образом, представляется целесообразным рассматривать многокритериальную свёртку вместо (3):

$$\mu(b \& d) = \alpha_b \mu(b) + \alpha_d \mu(d); \quad \alpha_b + \alpha_d = 1, \quad \alpha_b, \alpha_d \geq 0. \quad (4)$$

Линейный характер (4) правомерен при независимости посылок. Выяснить возможность линейной свёртки типа (4) можно с помощью известных статистических подходов, например, на основе линейного дискриминантного анализа [7] или техники построения классифицирующего дерева, как описано в [8]. Аналогичным образом для определения весовых коэффициентов (приоритетов) посылок α_b, α_d можно строить матрицу приоритетов и применять технику Т. Саати [9].

Итак, выполненные выше действия привели к многоссылочному варианту формулы (2). В случае двух посылок она принимает следующий вид (для большего числа посылок обобщение достигается очевидным образом):

$$\mu(a|c \& d) = \mu(a|b = \alpha_c c + \alpha_d d) = \begin{cases} 0, & \mu(a) = 0; \\ 0,5, & 0 < \mu(b) \leq 0,5; \\ (2\mu(a) - 1)\mu(b) + 1 - \mu(a); \\ \alpha_c + \alpha_d = 1, & \alpha_c, \alpha_d \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Далее покажем, как применить рассмотренный формальный аппарат для практической задачи регулирования учебного процесса на основании ответов учащихся.

Пример практического использования условной логической формулы

Предложено использование условной логической формулы трехзначного исчисления в процессе тестирования знаний учащихся. При этом необходимо принимать во внимание следующие признаки и критерии:

К1 – владение базисными понятиями;

- К2** – способность применять базисные понятия в практических приложениях;
К3 – владение материалом в целом;
К4 – умение выделять множество факторов, влияющих на итоговый результат;
К5 – оперативность мышления;
К6 – процент ошибочных суждений/заключений/выводов;
К7 – процент успешно выполненных практических упражнений с учетом их сложности;
К8 – ориентация в сложных вопросах курса;
К9 – концентрация внимания;
К10 – алгоритмичность мышления.

Необходимо также ввести перечень следующих управляющих воздействий:

- R1** – углубить обучение в части базовых понятий;
R2 – увеличить (расширить) практическую составляющую курса;
R3 – увеличить мультимедийную составляющую;
R4 – пригласить на лекцию профессионала(ов)/эксперта(ов);
R5 – усложнить материал практических/лабораторных занятий;
R6 – упростить материал практических/лабораторных занятий;
R7 – предложить студентам выступить с рефератом (докладом) на лекции;
R8 – организовать выступление студентов на СНТК;
R9 – подготовка совместной(-ых) со студентами публикации(ий);
R10 – модернизировать лекционный курс;
R11 – проводить/усилить регулярный (текущий) опрос;
R12 – издать/переиздать учебно-методическое пособие по курсу;
R13 – ввести в обучение элементы игры/соревнования;
R14 – рассмотреть новейшие технологические разработки по теме;
R15 – изучить/углубить опыт ведущих университетов;
R16 – включить студентов в рамки НИР/ХД;
R17 – организовать контакт со студентами/преподавателями других вузов;
R18 – расширить рейтинговую систему оценки и рейтинговый контроль;
R19 – модифицировать сами материалы тестов;
R20 – выполнить анкетирование студентов для анализа слабых позиций в организации обучения;
R21 – расширить рамки использования материалов патентов и изобретений.

Детализация приведенных выше критериев и управляющих воздействий состоит в следующем (ограничиваемся критерием К1).

К1. Данный критерий формируется по следующим признакам:

- К₁₁** – непонимание формул, где фигурируют переменные (понятия), введенные в ранее изложенном материале;
К₁₂ – неверные ответы на вопросы, затрагивающие ранее изученный материал;
К₁₃ – ошибки в интерпретации единиц измерений;
К₁₄ – смешивание (подмена) понятий;
К₁₅ – плохое знание английских технических терминов.

На основании критерия К1 вырабатываем управление R1 (как основное), которое зависит от признаков К₁₁–К₁₅. Многопосылочную свёртку выполняем по условной нечеткой формуле

$$\mu(R1|\alpha_{11}K_{11} + \dots + \alpha_{15}K_{15}).$$

Для отыскания весов признаков составляем матрицу приоритетов Т. Саати (табл. 2).

Таблица 2. Матрица приоритетов Т. Саати
Table 2. Priorities matrix by T. Saati

Критерий / Criterion	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄	K ₁₅	$\Pi_{ij}^{0,2}$	α_i
K ₁₁	1	1	3	3	6	$54^{0,2} \approx 2,2$	0,35
K ₁₂	1	1	3	3	6	$54^{0,2} \approx 2,2$	0,35
K ₁₃	1/3	1/3	1	1	2	$2/9^{0,2} \approx 0,74$	0,12
K ₁₄	1/3	1/3	1	1	2	$2/9^{0,2} \approx 0,74$	0,12
K ₁₅	1/6	1/6	1/2	1/2	1	$1/144^{0,2} \approx 0,37$	0,06

Допустим, получены следующие нечеткие оценки признаков:

$$\mu(K_{11}) = 0,6, \mu(K_{12}) = 0,8, \mu(K_{13}) = 0,8, \mu(K_{14}) = 0,5, \mu(K_{15}) = 0,6.$$

Находим $\mu(b) = 0,6 \cdot 0,35 + 0,8 \cdot 0,35 + 0,8 \cdot 0,12 + 0,5 \cdot 0,12 + 0,6 \cdot 0,06 = 0,682$. По формуле (5) получаем

$$\mu(R1|b) = (2\mu(R1) - 1)\mu(b) + 1 - \mu(R1). \quad (6)$$

Для принятия решения на основе формулы (6) необходима связь между величинами $\mu(R1|b)$ и $\mu(R1)$. Следуя [10], передадим такую связь матрицей нечеткого отношения «вход-выход» (табл. 3).

Таблица 3. Задание нечеткого отношения «вход-выход»
Table 3. Setting fuzzy relationship “input-output” matrix

Показатель / Index	$\mu(b)$	Степень коррекции / Degree of correction		
		незначительная $\mu(R1) = 0,3$ / insignificant $\mu(R1) = 0,3$	средняя $\mu(R1) = 0,6$ / average $\mu(R1) = 0,6$	значительная $\mu(R1) = 0,9$ / significant $\mu(R1) = 0,9$
S_{ij}	0–0,3	0,9	0,1	0
	0,3–0,6	0,3	0,5	0,1
	0,6–1,0	0	0,3	0,9

Табл. 3 заполняется экспертом и используется таким образом, чтобы установить значение $\mu(R1|b)$. В ячейках таблицы записаны нечеткие оценки S_{ij} целесообразности выставленного уровня регулирования R1 на входе b . Так, для входа, определенного в нижней строке табл. 3, имеет место $b \in [0,6-1,0]$ (в рассматриваемом случае $\mu(b) = 0,682$). Мера целесообразности S_{ij} незначительной степени коррекции процесса в части улучшения усвоения базовых понятий равна 0, средней – 0,3, значительной – 0,9. Произведем расчет на основе формулы (6) по каждому из трех вариантов:

$$\begin{aligned} \mu(R1) = 0,3, \mu(b) = 0,682, \mu(R1|b) &= 0,43; \\ \mu(R1) = 0,6, \mu(b) = 0,682, \mu(R1|b) &= 0,54; \\ \mu(R1) = 0,9, \mu(b) = 0,682, \mu(R1|b) &= 0,65. \end{aligned} \quad (7)$$

Заключительный шаг состоит в вычислении средневзвешенного по оценкам целесообразности уровня регулирования R1 по формуле

$$\mu(R_i | b) = \frac{\sum_{k=1,2,3} S_{ik} \mu(R_k | b)}{\sum_{k=1,2,3} S_{ik}}, \quad (8)$$

где $\mu(R_k|b)$ – соответствует вычисленным значениям (7): $\mu(R1_1|b) = 0,43$; $\mu(R1_2|b) = 0,54$; $\mu(R1_3|b) = 0,65$.

Получаем итоговую средневзвешенную оценку

$$\mu(R1|\mu(b) = 0,682) = (0 \cdot 0,43 + 0,3 \cdot 0,54 + 0,9 \cdot 0,65)/(0 + 0,3 + 0,9) \approx 0,63.$$

Вывод: уровень коррекции образовательного процесса в части улучшения усвоения базовых понятий имеет метрическое значение 0,63, т. е. ближе к среднему варианту. Другие критерии можно обрабатывать по аналогии (ввиду размеров статьи формальные примеры не приводятся). Детализация по существу состоит в следующем.

К2. Данный критерий формируется по следующим признакам:

- верные/неверные ответы на технические/программистские вопросы;
- допущение нереальных технических/программистских гипотез;
- плохие ответы на предложения по выбору технических/программистских решений;
- неверная оценка затрат на реализацию;
- незнание состояния дел в сфере;
- незнание фамилий известных специалистов;
- незнание сути применяемых технологий.

К3

1. Ответ менее, чем на половину вопросов.
2. Ответ на 60–70 % вопросов.
3. Ответ на 80–100 % вопросов.

К4

1. Процент ответов не по существу вопроса.
2. Акцентирование внимания на второстепенных/вторичных признаках.

К5

1. Время ответа значительно отклоняется от среднего по группе тестируемых.
2. Время ответа в пределах нормы.

К6

1. Нарушение логичности (алогичность) рассуждения.
2. Плохое представление сути задачи (отсутствие образности, неумение абстрагироваться).
3. Непонимание имеющихся закономерностей.

К7

1. Процент правильных ответов на вопросы повышенной сложности низкий.
2. Процент правильных ответов на вопросы повышенной сложности в пределах нормы.
3. Процент правильных ответов на вопросы повышенной сложности высокий.

К8

1. Число найденных закономерностей мало.
2. Пропущены элементы формул.
3. Описки.
4. Решение не доведено до конца.

К9

1. Способность правильно составлять алгоритм/план решения задачи.
2. Разработанные программные коды допускают зависание/неправильные входные данные.
3. Решение не имеет обоснования или обосновано неверно.

Заключение

1. Изложенный подход сочетает в себе достоинства метода Т. Саати и возможности формального выражения для условной нечеткой меры, к которой не применима теорема Байеса.

2. Линеаризация многопосылочной свёртки критериев достигается независимостью критериев. Это обеспечивает естественное использование линейной свёртки в формуле условной нечеткой меры.

3. Формула для условной нечеткой меры в непрерывном случае может быть переосмыслена с тем, чтобы заменить линейный сегмент графика на иной, допуская нелинейность (например, сигмоидного типа) в области, близкой к $b = 0,5$ и $b = 1,0$.

4. Можно рекомендовать использовать шкалу Харрингтона для разбиения интервала изменения условной нечеткой переменной. Шкала Харрингтона состоит из пяти интервалов единичного отрезка, характеризующих степень приближения к наилучшему (идеальному) варианту: очень высокая (0,8–1,0); высокая (0,63–0,80); средняя (0,37–0,63); низкая (0,20–0,37); очень низкая (0–0,20). Преимуществом ее использования является большая свобода выбора значения нечеткой меры с учетом мнения лица, принимающего решение (эксперта).

Список литературы

1. Герман, О. В. Логическое исчисление, использующее нечеткие формулы / О. В. Герман, А. А. Линник // Вестник БНТУ. 2005. № 5. С. 55–58.
2. Mamdani, E. H. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // Int. J. Man Mach. Stud. 1975. No 7. P. 1–13.
3. Тэрано, Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
4. Larsen, P. M. Industrial Applications of Fuzzy Logic Control / P. M. Larsen // International Journal of Man-Machine Studies. 1980. Vol. 12, No 1. P. 3–10.

5. Дюбуа, А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / А. Дюбуа, Д. Прад. М.: Радио и связь, 1990. 284 с.
6. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. М.: Мир, 1976. 165 с.
7. Izenman, A. J. *Modern Multivariate Statistical Techniques. Regression, Classification, and Manifold Learning* / A. J. Izenman. N.Y.: Springer, 2008. 757 p.
8. Герман, О. В. Многомерный нечеткий распознаватель на основе четкого распознавателя и его оценка / О. В. Герман, Н. Л. Боброва // Доклады БГУИР. 2013. № 6. С. 67–71.
9. Saati, T. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP* / T. Saati. Pitsburg: RWS Publication, 1994. 500 p.
10. Герман, О. В. Неклассические логические исчисления / О. В. Герман. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2012. 124 с.

References

1. German O. V., Linnik A. A. (2005) Logical Calculus Using Fuzzy Formulas. *Vestnik BNTU*. (5), 55–58 (in Russian).
2. Mamdani E. H., Assilian S. (1975) An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *Int. J. Man Mach. Stud.* (7), 1–13.
3. Terano T., Asai K., Sugeno M. (1993) *Applied Fuzzy Systems*. Moscow, Mir Publ. 368 (in Russian).
4. Larsen P. M. (1980) Industrial Applications of Fuzzy Logic Control. *International Journal of Man-Machine Studies*. 12 (1), 3–10.
5. Dyubua A., Pradd D. (1990) *The Possibility Theory. Applications for Knowledge Representation in Informatique*. Moscow, Radio i Sviaz Publ. 284 (in Russian).
6. Zade L. (1976) *A Notion of Linguistical Variable and its Application to Approximate Decision Making*. Moscow, Mir Publ. 165 (in Russian).
7. Izenman A. J. (2008) *Modern Multivariate Statistical Techniques. Regression, Classification, and Manifold Learning*. N.Y., Springer Publ. 757.
8. German O. V., Bobrova N. L. (2013) Multidimensional Fuzzy Recognizer on the Basis of a Crisp Recognizer and its Estimation. *Doklady BGUIR*. (6), 67–71 (in Russian).
9. Saati T. (1994) *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP*. Pitsburg, RWS Publication. 500.
10. German O. V. (2012) *Non-Classical Logical Calculi*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Publ. 124 (in Russian).

Вклад авторов

Герман О. В. определил общую концепцию работы, написал введение.

Герман Ю. О. указала способ интеграции методики Т. Саати для получения интегрального значения многопосылочной части в нечеткой условной формуле, написала заключение.

Мигалевич С. А. продемонстрировал практическое использование условных нечетких формул для задач регулирования учебного процесса по результатам тестирования.

Кузнецов М. В. обосновал линеаризацию многопосылочной свёртки, рассмотрел существующие методы линеаризации.

Author's contribution

German O. V. defined the general concept of the work, wrote the introduction.

German Ju. O. indicated a way to integrate the T. Saati technique to obtain the integral value of the multi-variable part in a fuzzy conditional formula, wrote a conclusion.

Migalevich S. A. demonstrated the practical use of conditional fuzzy formulas for the tasks of regulating the educational process based on test results.

Kuznetsov M. V. substantiated the linearization of multi-variable convolution, considered the existing methods of linearization.

Сведения об авторах

Герман О. В., к. т. н., доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Герман Ю. О., к. т. н., доцент кафедры электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Мигалевич С. А., начальник центра информатизации и инновационных разработок, соискатель кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Кузнецов М. В., аспирант кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 612-42-32
E-mail: ovgerman@tut.by
Герман Олег Витольдович

Information about the authors

German O. V., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

German Ju. O., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Electronic Computers of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Migalevich S. A., Head of the Center of Informatization and Innovations, Applicant at the Department of Software Provision of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kuznetsov M. V., Postgraduate at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 612-42-32
E-mail: ovgerman@tut.by
German Oleg Vitoldovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-84-92>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.17

МЕТОД ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛИ НА ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ ПРИ ДВУХ КРИТЕРИЯХ КАЧЕСТВА

С. В. ЧЕБАКОВ¹, Л. В. СЕРЕБРЯНАЯ^{2,3}

¹Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

²БИП – Университет права и социально-информационных технологий (г. Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 17.03.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрены особенности построения и применения графовых моделей для решения прикладных задач. Предложена графовая модель с двумя критериями качества, на которой выполняется поиск оптимальных путей между заданными вершинами графа. Каждое ребро графа имеет весовой коэффициент, определяющий количество временных единиц, требуемых для прохождения данного ребра. Каждая вершина может находиться в одном из двух состояний: «открыто» или «заблокировано». Первоначально все вершины открыты, однако их состояния могут изменяться в процессе решения задачи. Поиск решения ограничен заданным временем. Если в ходе движения по выбранному маршруту вершины графа становятся заблокированными, требуется искать альтернативные пути достижения цели. Определено понятие допустимого пути на графе. Построено паретовское множество, из которого по заданному правилу выбраны допустимые пути. Для этого разработана процедура выбора пути из множества Парето. По завершении выбора путь считается оптимальным для движения по нему из начальной вершины в целевую. Представлены ситуации, которые могут происходить в процессе выбора пути и прохождения по нему. Их появление – следствие изменения состояний вершин графа. На основе процедуры выбора разработан алгоритм поиска оптимальных путей между заданными вершинами на графовой модели.

Ключевые слова: графовая модель, оптимальный путь, множество Парето, состояние вершины, алгоритм поиска.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Чебаков, С. В. Метод достижения цели на графовой модели при двух критериях качества / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 84–92. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-84-92>.

METHOD OF ACHIEVING THE GOAL ON A GRAPH MODEL WITH TWO QUALITY CRITERIA

SERGEY V. CHEBAKOV¹, LIYA V. SEREBRYANAYA^{2,3}

¹Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

²BIP – University of Law and Social-Information Technologies (Minsk, Republic of Belarus)

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17.03.2023

Abstract. The features of the construction and application of graph models for solving applied problems are considered. A graph model with two quality criteria is proposed, on which the search for optimal paths between given graph vertices is performed. Each edge of the graph has a weighting factor that determines the number of time units

required to pass this edge. Each vertex can be in one of two states: “open” or “locked”. Initially, all vertices are open, but their states may change in the process of problem solving. The search for a solution is limited by a given time. If during the movement along the chosen route the graph vertices become blocked, it is necessary to look for alternative ways to achieve the goal. A method for constructing a Pareto set from which admissible paths are selected is proposed. The notion of an admissible path on a graph is defined. A procedure for choosing a path from the Pareto set has been developed. Upon completion of the choice, the path is considered optimal for following it from the initial vertex to the target. Situations that can occur in the process of choosing a path and passing along it are presented. Based on the selection procedure, an algorithm for finding optimal paths between given vertices on a graph model has been developed.

Keywords: graph model, optimal path, Pareto set, vertex state, search algorithm.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2023) Method of Achieving the Goal on a Graph Model with Two Quality Criteria. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 84–92. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-84-92> (in Russian).

Введение

Построение модели – важный этап в ходе решения любой исследовательской или научной задачи. Среди многообразия используемых моделей наиболее популярными считаются графовые. Это объясняется тем, что большинство задач из разных прикладных областей может быть представлено на графах. Преимущество графовых моделей – это то, что на их основе можно выдвигать и проверять гипотезы о причинно-следственных связях в изучаемых объектах, процессах и явлениях. Кроме того, графы – общедоступное средство объяснения сложных ситуаций на интуитивном уровне.

Для большинства решаемых задач требуется выявить структуру зависимостей между данными при их разнообразной обработке. Часто это выполняется с помощью графового моделирования, в котором структура зависимостей между данными представляется в виде графа. В данном случае вершины графа отождествляются с изучаемыми объектами, а ребра или дуги графа указывают на наличие зависимости между соответствующими объектами. Обобщенно графовая модель – это представление многомерного распределения объектов в виде графа [1–3].

Наиболее часто на графовых моделях осуществляется поиск путей, удовлетворяющих заданным условиям. В статье выполнен поиск путей на неориентированном графе при введенных двух критериях качества. Подходящий путь выбирали из множества Парето. При этом ситуации на графе могут изменяться в ходе решения задачи, что требует выбора нового пути для движения к целевой вершине, а также контроля выполнения всех заданных требований.

Процесс достижения цели на графе при неизменном состоянии вершин

В процессе исследований выполняли поиск оптимальных путей на графовой модели. Граф состоит из элементов двух типов: вершин и ребер. Каждое ребро имеет весовой коэффициент, определяющий количество временных единиц, которые требуются для прохождения данного ребра. Каждая вершина может находиться в одном из двух состояний: «открыто» или «заблокировано». Первоначально все вершины находятся в состоянии «открыто». Состояние вершин может изменяться во времени. Проходить через вершину можно только тогда, когда она находится в состоянии «открыто». Пусть заданы начальная v_0 и целевая v_n вершины графа G . Требуется за минимально возможное время достигнуть целевой вершины в процессе движения по графу. Структура графа не изменяется в течение всего времени решения поставленной задачи. Для достижения целевой вершины определено допустимое время, обозначенное величиной ресурса T .

Определение 1. Допустимым будет считаться путь из начальной к целевой вершине, чье время достижения цели меньше либо равно заданному ресурсу T и все вершины которого находятся в состоянии «открыто». Каждому отдельному альтернативному пути соответствует время достижения заданной цели. Предположим, для движения к цели выбран один из путей с наименьшим временем, все вершины которого находятся в состоянии «открыто». Если выбранный путь состоит из большого количества вершин, то движение по нему не всегда оказывается оптимальным из-за того, что любая из его вершин может перейти в процессе движения в состояние «заблокировано». Следовательно, потребуется перейти к другому пути, на что потратится дополнительный ресурс.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель и алгоритм, позволяющие управлять процессом достижения цели. Для характеристики каждого альтернативного пути, кроме показателя времени достижения цели, введен второй критерий – число вершин, которые необходимо пройти по каждому пути от начальной до конечной вершины. В предложенном двухкритериальном пространстве предпочтений определено отношение доминируемости на множестве всех альтернативных путей достижения заданной цели [4, 5]. Введем несколько определений для данной модели.

Определение 2. Путь a доминирует над путем b при выполнении одного из условий:

- время достижения цели по пути a меньше времени достижения цели по пути b и число вершин графа пути a меньше либо равно числу вершин пути b ;
- время достижения цели по пути a меньше либо равно времени по пути b и число вершин пути a меньше числа вершин пути b .

Определение 3. Множество Парето на множестве всех альтернативных путей из начальной в конечную вершину во введенном двухкритериальном пространстве представляет собой множество всех недоминируемых вариантов достижения цели.

Из Определения 3 следует, что для любого пути достижения заданной цели, не входящего в множество Парето, в нем существует путь, который над ним доминирует. Алгоритм построения множества Парето в двухкритериальном пространстве не требует методов перебора, для него достаточно поиска решения в упорядоченных структурах данных [6].

Будем считать, что число допустимых путей намного больше единицы. Предположим, на множестве альтернативных путей достижения заданной цели определено множество Парето в соответствии с Определениями 2 и 3. Выберем некоторый путь P из множества Парето.

Определение 4. Пусть S – первая вершина пути P , начинающегося в начальной вершине, в которой имеется возможность продолжить движение по некоторому пути достижения цели, отличному от P . Коэффициентом продолжения данного пути принято число альтернативных путей из множества Парето, приводящих к целевой вершине из вершины S .

Все пути из множества Парето имеют общую часть с путем P от начальной вершины, включая вершину S . Будем считать, что вершина S имеет коэффициент продолжения, равный числу альтернативных путей из множества Парето, приводящих из S в целевую вершину v_n . Начальную вершину v_0 можно, в частности, рассматривать как продолжение условного пути с нулевым временем достижения начальной вершины. Предположим, что коэффициент продолжения начальной вершины равен единице. Тогда, если прерван процесс прохождения данного пути, невозможен выбор какого-либо иного альтернативного пути, кроме выполняемого в данный момент. Следовательно, нельзя достигнуть цели в ситуации прекращения движения по данному пути в любой вершине, пока не достигнута вершина с коэффициентом больше единицы. Будем считать, что начальная вершина имеет коэффициент продолжения больше единицы.

Влияние величины коэффициента продолжения на процесс достижения цели можно показать следующим образом. Пусть при движении по выбранному пути пройдена вершина S с коэффициентом продолжения больше единицы, в ней выбран путь для дальнейшего движения к цели. Тогда при невозможности на некотором шаге продвижения по данному пути достаточно вернуться не в начальную, а в последнюю пройденную вершину с коэффициентом продолжения больше единицы, т. е. в вершину S . Следовательно, каждый раз, выбирая путь с коэффициентом больше единицы, уменьшаются возможные потери при переходе на другой путь достижения цели.

При движении из начальной вершины существует два варианта развития событий:

- пройдены все вершины пути и целевая вершина достигнута;
- выполнение очередной вершины оказалось невозможным.

Рассмотрим первый случай. Выбор для реализации конкретного пути из множества Парето осуществляется следующим образом. Предположим, что в начальной вершине v_0 существуют пути с коэффициентом продолжения больше единицы, которые входят в множество Парето. На этом подмножестве находим путь P с координатами, минимально отличающимися значениями по обоим критериям от средних значений координат у элементов данного подмножества. Пусть в ходе движения по пути P была достигнута вершина S , имеющая коэффициент продолжения больше единицы. Для выбора альтернативного пути в вершине S применяется двухкритериальная модель, в которой критериями выбора каждого пути являются значение времени дости-

жения цели и число вершин, пройденных при реализации конкретного маршрута. Это требует нахождения множества Парето на множестве альтернативных путей достижения заданной цели из вершины S и определения пути из этого множества Парето для дальнейшей реализации. Тогда справедливо следующее Утверждение.

Утверждение. Пусть сформировано множество Парето альтернативных путей достижения заданной цели из вершины S , рассматриваемой в качестве начальной, при новом значении ресурса T_1 . Оно совпадает с множеством Парето на наборе альтернативных путей, полученных при их построении из начальной вершины при значении первого ресурса, равного T , и проходящих через вершину S .

Доказательство. У всех альтернативных путей из начальной вершины к целевой, продолжением которых являются пути, выходящие из вершины S , есть общая часть. Это маршрут на графе из начальной вершины к S с затраченным ресурсом U и определенным количеством вершин. Следовательно, каждый путь из вершины S к целевой вершине формируется с использованием измененного ресурса $T_1 = T - U$. Альтернативный путь достижения цели существует как из вершины S , так и из вершины v_0 . Пусть имеется допустимый путь L из вершины v_0 через S , время прохождения которого меньше или равно величине T . Тогда и путь из вершины S , представляющий собой продолжение пути L , также является допустимым путем из S при ресурсе T_1 . Пусть G_s – допустимые пути достижения цели из множества Парето в вершине S , а G_v – допустимые пути достижения цели, входящие в множество Парето из начальной вершины v_0 и проходящие через S . Хотя бы один такой путь существует, это – путь P . Покажем, что его продолжение P_s из вершины S до целевой вершины является тоже паретовским путем в множестве допустимых путей из S . Предположим противное – путь P_s из вершины S до целевой вершины является доминируемым в соответствии с Определением 2. У пути P от v_0 к целевой вершине v_n и пути P_s существует общая часть. При этом P_s , по предположению, является доминируемым. Тогда и путь P будет доминируемым на множестве всех альтернативных путей из начальной вершины к целевой, что противоречит тому факту, что P принадлежит множеству Парето. Это же рассуждение справедливо и для любого допустимого пути из множества G_v . Предположим, существует путь A из множества G_s такой, что допустимый путь из вершины v_0 , чьим продолжением есть A , является доминируемым. В этом случае и путь A является доминируемым, а это противоречит тому факту, что A принадлежит множеству G_s . Аналогичное рассуждение справедливо и для любого допустимого пути из множества G_s . Следовательно, множества G_s и G_v совпадают. Утверждение доказано.

Из этого Утверждения следует, что нет необходимости находить все множество Парето альтернативных путей достижения цели в вершине S . Достаточно рассмотреть в ней элементы паретовского множества, определенного в начальной вершине v_0 и проходящего через S .

На следующем этапе требуется выбрать из S путь для дальнейшего движения к целевой вершине. Будем рассматривать ее как новую начальную вершину и назовем вторичной начальной вершиной по сравнению с v_0 , которая считается первичной начальной вершиной. Первоначально значение ресурса времени для определения вариантов допустимых путей равно величине T_1 . В паретовском множестве определяются пути из вторичной начальной вершины S к целевой вершине, имеющие коэффициенты продолжения больше единицы. Для прохождения выбирается путь из множества Парето, начинающийся в вершине S и имеющий значения критериев, достаточно близкие к их средним значениям среди элементов множества Парето. Пусть достигнута вершина S_1 с возможностью выбора в ней альтернативного пути достижения цели. Для измененного значения ресурса $T_2 = T_1 - U_1$ требуется определить новое множество Парето альтернативных путей достижения цели из вершины S_1 . Вместе с тем в S_1 справедливо Утверждение при условии, что начальной вершиной считается S , а направление движения на графе – вершина S . Следовательно, и в S_1 достаточно рассмотреть подмножество уже определенных паретовских путей во вторичной начальной вершине S . Таким образом, при выборе путей в каждой вершине с коэффициентом продолжения больше единицы, в соответствии с Утверждением, используются продолжения ранее выбранных паретовских путей, определенных в произвольной начальной вершине.

Предположим, что при рассмотрении какой-либо начальной вершины в паретовском множестве не существует путей с коэффициентами продолжения, большими единицы. В этом случае каждый допустимый путь из данного множества до целевой вершины имеет собственный уни-

кальный участок. Тогда для реализации выбирается путь, имеющий значения критериев, достаточно близкие к их среднему значению среди элементов множества Парето в данной вершине. Поскольку, по предположению, условия прохождения всех вершин на любом выбираемом пути выполнены, целевая вершина будет достигнута.

Рассмотрена общая схема процесса достижения цели, определен приоритет выбора путей в паретовских множествах из указанных вершин графа. Все паретовские множества, определенные в вершинах с коэффициентом продолжения больше единицы, представляют собой подмножества паретовского множества, построенного в предыдущей начальной вершине. При этом двухкритериальная модель используется для оптимизации процесса достижения цели с заданным ресурсом времени T и при возникновении ситуации, когда не может быть пройдена какая-либо вершина из выбранного пути. В этом случае невозможно ограничиваться паретовскими путями, определенными только в указанной начальной вершине.

Выбор путей достижения цели на графе при изменяющихся состояниях вершин

Рассмотрим алгоритм поиска оптимальных маршрутов между заданными вершинами на графовой модели. Предположим, в начальной вершине v_0 сформированы допустимые альтернативные пути достижения цели и определено множество Парето. Выполняем процедуру выбора конкретного пути из паретовских элементов для движения по нему. Входные параметры этой процедуры следующие:

– набор паретовских элементов на сформированном множестве допустимых альтернативных путей достижения цели из заданной начальной вершины U_j , первичной или вторичной, где $j = 1, h$. Переменная h определяет количество различных начальных вершин, рассмотренных при выполнении процедуры в процессе решения задачи;

– величина $T_i = T$ при $i = 0$, либо находится в процедуре при других значениях i .

Назначение этой процедуры состоит в выборе пути достижения цели из заданной начальной вершины U_j среди элементов паретовского множества и его прохождении. Рассмотрим шаги процедуры выбора.

1. На множестве Парето определяются альтернативные пути достижения цели из вершины U_j , которые включают в себя вершины с коэффициентом продолжения больше единицы. Если такие пути существуют, то следует переходить к шагу 2, иначе любой путь на множестве Парето из заданной начальной вершины U_j соответствует безальтернативному прохождению каждой вершины пути при движении к цели. Тогда на паретовском множестве определяется путь с координатами, значения которых по обоим критериям стремятся к средним величинам координат среди всех элементов множества Парето. Предположим, что в процессе движения по данному маршруту его очередная вершина находится в состоянии «заблокировано». Тогда на величину Z_i ресурса T , который требуется для возвращения в начальную вершину U_j , уменьшается значение T . Полученное значение ресурса представляет собой величину

$$T_i = T_{i-1} - Z_i, \quad i = 1 \dots N_s, \quad (1)$$

где N_s – число проведенных корректировок T в течение всего времени решения задачи.

После каждой проведенной корректировки ресурса или достижения цели происходит выход из процедуры. Если в процессе движения по выбранному пути не существует вершины в состоянии «заблокировано», то целевая вершина обязательно будет достигнута.

2. Среди всех альтернативных путей из начальной вершины U_j в вершины с коэффициентом продолжения больше единицы находится путь с координатами, стремящимися к средним значениям координат путей из этого подмножества. Пусть в процессе движения по выбранному пути была пройдена вершина графа V с коэффициентом продолжения больше единицы. Теперь она будет считаться начальной вторичной вершиной. Затем уменьшается значение ресурса на величину, необходимую для достижения вершины V . Предположим, что при реализации выбранного пути еще не достигнута вершина V , но очередная вершина находится в состоянии «заблокировано». В соответствии с (1) выполняется корректировка значения ресурса, требуемого для возврата в начальную вершину U_j . Пусть после изменения значение ресурса оказалось меньше либо равно нулю, что соответствует ситуации полного исчерпания ресурса T . Если произойдет любая из приведенных ситуаций, то происходит выход из процедуры.

В результате выполнения процедуры выбора могут появиться следующие ситуации.

1. Достигнута заданная целевая вершина, и решение задачи заканчивается.

2. Очередная вершина альтернативного пути, определенного в процедуре выбора, представляет собой вершину V с коэффициентом продолжения больше единицы и значением ресурса T_i больше нуля. Она является вторичной начальной вершиной. Затем, в соответствии с Утверждением, определяется новое множество Парето путей достижения цели из этой начальной вершины. Далее выполняется процедура выбора со значением параметра U_j , равным V . После ее выполнения вновь анализируются ситуации на графе.

3. Предположим, что после выполнения процедуры выбора очередная вершина пути, начинающегося в вершине U_j , находится в состоянии «заблокировано». В таком случае изменяется значение ресурса T_i , как показано в (1). Далее формулируется новая подзадача достижения цели. Для значения ресурса T_i определяется множество допустимых путей достижения цели из U_j в соответствии с Определением 1. Если такие пути существуют, формируется новое паретовское множество. Затем выполняется процедура выбора и анализируются ситуации, появившиеся после ее завершения. Кроме того, значение ресурса в формируемой подзадаче всегда меньше, чем его значение, которое было при вызове процедуры выбора, где он корректировался. Допустимые пути определяются из одной и той же начальной вершины. Следовательно, формируемое множество допустимых путей подзадачи включается в ранее построенное аналогичное множество. В частности, эти два множества могут совпадать.

Ситуация, когда при имеющемся значении ресурса для подзадачи не существуют допустимые пути из вершины U_j , рассматривается в следующем пункте.

4. Пусть в результате выполнения процедуры выбора возникла следующая ситуация. При движении по выбранному паретовскому пути очередная вершина находится в состоянии «заблокировано» и по возвращении в вершину U_j значение ресурса T_i оказалось исчерпанным. Это означает, что еще существуют альтернативные пути достижения цели из начальной вершины U_j , все вершины которых находятся в состоянии «открыто». При этом ни один из путей не является допустимым, поскольку их время выполнения больше значения T_i . Рассмотрим возможные продолжения решения задачи.

4.1. Пусть ресурс исчерпан, когда U_j совпадает с начальной вершиной v_0 . Тогда задача не может быть решена при заданном значении ресурса. Переход к пункту 4.3.

4.2. Пусть вершина U_j является вторичной начальной вершиной и значение ресурса больше нуля. В этом случае требуется определить другую, ранее пройденную, начальную вершину, первичную или вторичную, с коэффициентом продолжения больше единицы. Предполагается, что из нее существуют допустимые пути достижения цели при значении ресурса T_i . При этом необходимо учесть уменьшение ресурса на величину, требуемую для перехода в эту вершину. Если такая вершина H существует, то из нее формируется множество допустимых путей достижения цели в соответствии с Определением 1. Затем определяются координаты путей в пространстве предпочтений и находится новое множество Парето. После чего выполняется процедура выбора, где параметр U_j становится равным H , и анализируются возможные ситуации. Если подходящей начальной вершины H не существует, то осуществляется переход к пункту 4.3.

4.3. Для возможного продолжения решения поставленной задачи необходимо увеличение ресурса T_i . Значение, на которое увеличивается ресурс, зависит от уже построенных путей достижения цели из вершины U_j . Формируется новая подзадача достижения цели с начальной вершиной U_j и новым значением ресурса $T_{\text{нов}}$. Если U_j совпадает с первичной начальной вершиной v_0 , то подзадача представляет собой первоначальную задачу с новым значением ресурса. Пусть U_j является вторичной начальной вершиной. Поскольку она была достигнута при движении на графе из первичной вершины v_0 , решение сформулированной подзадачи приводит к решению и первоначальной задачи достижения цели.

С учетом нового значения ресурса $T_{\text{нов}}$ определяются все допустимые альтернативные пути достижения цели из U_j . На этом множестве путей находится множество Парето в заданном двухкритериальном пространстве. Выполняется процедура выбора и анализируются возможные ситуации после ее завершения. При невозможности увеличения ресурса целевая вершина не будет достигнута, и решение задачи прекращается.

5. Предположим, после выполнения процедуры выбора оказалось, что рассмотрено все множество альтернативных путей достижения цели из начальной вершины U_j , у которых все вершины находились в состоянии «открыто». Однако целевая вершина еще не достигнута. При этом в результате последнего изменения, в соответствии с (1), ресурс времени T_i остается больше нуля. Пусть процедура выбора выполнена, когда U_j совпадает с первичной начальной вершиной v_0 . Тогда процесс решения задачи прекращается, поскольку рассматриваемая задача не может быть решена при заданных начальных данных. Если U_j является вторичной начальной вершиной, то ситуация аналогична случаю исчерпания ресурса, который рассматривался в пункте 4.2. Это объясняется тем, что требуется переходить к другой начальной вершине. Выполняются все действия пункта 4.2 за исключением перехода на пункт 4.3. При нахождении новой начальной вершины выполняется процедура выбора и анализируются полученные ситуации. Пусть подходящая начальная вершина, из которой существуют допустимые пути достижения цели при заданном значении ресурса, не определена. Тогда в качестве начальной вершины рассматривается первая из ранее пройденных по данному пути начальная вершина E с коэффициентом продолжения больше единицы. Предположим, из нее существуют пути достижения цели, и все их вершины находятся в состоянии «открыто». При этом для прохождения вершин необходимо увеличение ресурса T_i . Если увеличение невозможно либо требуемой вершины E не существует, то целевая вершина не достигнута, и решение задачи прекращается. В противном случае на основе нового значения ресурса формируются допустимые пути достижения цели из вершины E , определяются их координаты в двухкритериальном пространстве, находится множество Парето и выполняется процедура выбора.

На основе вышеизложенных возможных ситуаций, происходящих в ходе решения поставленной задачи, предложен алгоритм достижения целевой вершины на графе из заданной начальной вершины v_0 . Рассмотрим шаги алгоритма.

1. Определить существование путей достижения заданной цели из начальной вершины v_0 до целевой вершины. Если таких путей не существует, то решение задачи заканчивается, иначе переход к следующему шагу.

2. Определить все допустимые пути из начальной вершины v_0 до целевой вершины в соответствии с Определением 1. Если таких путей не существует, то для продолжения решения задачи требуется увеличение ресурса T . Переход к пункту 10. При существовании искомым путей переход к следующему шагу.

3. Определить значения критериев допустимых путей достижения цели во введенном двухкритериальном пространстве и построить множество Парето на нем.

4. Выполнить процедуру выбора.

5. Если в результате выполнения процедуры выбора достигнута целевая вершина, решение задачи найдено и алгоритм закончен, на шагах 6–9 рассматриваются возможные ситуации, которые происходят при выполнении процедуры выбора.

6. Пусть при выполнении процедуры выбора пройдена некоторая вершина V с коэффициентом продолжения больше единицы. В результате чего она становится новой вторичной начальной вершиной. Необходимо определить, используя Утверждение 1, новое паретовское множество. Переход к пункту 4.

7. Предположим, что после выполнения процедуры выбора очередная вершина пути из начальной вершины U_j находится в состоянии «заблокировано». Тогда получим уменьшенное значение ресурса T_j . Пусть для нового значения ресурса T_j можно определить множество допустимых путей достижения цели из U_j . В результате формируется подзадача с последним значением ресурса T_j и начальной вершиной U_j . Определяются значения критериев каждого допустимого пути во введенном двухкритериальном пространстве. Строится новое паретовское множество и выполняется переход к пункту 4. Если множество допустимых путей из вершины U_j не существует при указанном значении ресурса, переход к следующему пункту.

8. Пусть в результате выполнения процедуры выбора ресурс T исчерпан. Это означает, что альтернативные пути достижения цели из вершины U_j существуют, но ни один из них не является допустимым. Тогда выполняются действия, относящиеся к ситуации 4 по завершении процедуры выбора. Если для продолжения решения задачи требуется увеличение ресурса T , то переход к пункту 10, иначе целевая вершина не может быть достигнута.

9. Исчерпано все множество альтернативных путей достижения цели из начальной вершины U_j . При этом целевая вершина не достигнута, но оставшийся ресурс времени T_i больше нуля. Тогда выполняются действия, относящиеся к ситуации 5 по завершении процедуры выбора. Если в результате построено новое паретовское множество альтернативных путей достижения цели из определенной начальной вершины, то переход к пункту 4. Если требуется добавление ресурса, – переход к шагу 10.

10. Если увеличение ресурса невозможно, процесс решения задачи заканчивается. Иначе ресурс увеличивается на величину, достаточную для построения нового множества допустимых путей достижения цели из начальной вершины, первичной или вторичной. На этом множестве определяется новое множество Парето, переход к шагу 4.

Заключение

1. Рассмотрен неориентированный помеченный граф, на котором выполняется поиск оптимального пути из заданной начальной вершины в целевую вершину. Метка ребра – это количество временных единиц, требуемых для его прохождения. На достижение цели выделен временной ресурс T , и задача решается, пока он не исчерпан.

2. Предложена двухкритериальная модель качества, критериями которой являются время достижения цели и количество вершин графа, входящих в путь. Показано, что целесообразно выбирать допустимые пути из множества Парето, которое строится по двум указанным критериям. Поскольку ситуации на графе могут изменяться в процессе решения задачи, рассмотрен алгоритм корректировки ресурса времени и выбора оптимального пути на графе.

3. Выбранная модель отражает поведение объектов, процессов и явлений, характерных для многих задач из разных прикладных областей. Поэтому полученные результаты могут найти широкое прикладное применение.

Список литературы

1. Авдошин, С. М. Дискретная математика. Алгоритмы: теория и практика / С. М. Авдошин, А. А. Наббин. М.: ДМК Пресс, 2019. 282 с.
2. Алексеев, В. Е. Структуры данных и модели вычислений / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов; 2-е изд., испр. М.: ИНТУИТ, 2016. 256 с.
3. Костюкова, Н. И. Графы и их применение. Комбинаторные алгоритмы для программистов / Н. И. Костюкова; 2-е изд., испр. М.: ИНТУИТ, 2016. 305 с.
4. Чебаков, С. В. Алгоритм нахождения множества Парето на конечном наборе начальных данных / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Информатизация образования. 2017. Т. 79, № 1. С. 84–94.
5. Чебаков, С. В. Оптимизация решения задачи с ограничением на ресурсы / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Доклады БГУИР. 2016. Т. 102, № 8. С. 46–52.
6. Kung, H. F. On Finding the Maxima of a Set of Vectors / H. F. Kung, F. P. Preparata // Journal of the Association for Computing Machinery. 1975. No 22. P. 469–476.

References

1. Avdoshin S. M., Nabebin A. A. (2019) *Discrete Mathematics. Algorithms: Theory and Practice*. Moscow, DMK Press Publ. 282 (in Russian).
2. Alekseev V. E., Talanov V. A. (2016) *Data Structures and Computational Models*. 2nd ed., rev. Moscow, INTUIT Publ. 256 (in Russian).
3. Kostyukova N. I. (2016) *Graphs and their Application. Combinatorial Algorithms for Programmers*. 2nd ed., rev. Moscow, INTUIT Publ. 305 (in Russian).
4. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2017) Algorithm for Finding the Pareto Set on a Finite Set of Initial Data. *Informatization of Education*. 79 (1), 84–94 (in Russian).
5. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2016) Optimization of the Solution of a Problem with a Constraint on Resources. *Doklady BSUIR*. 102 (8), 46–52 (in Russian).
6. Kung H. F., Preparata F. P. (1975) On Finding the Maxima of a Set of Vectors. *Journal of the Association for Computing Machinery*. (22), 469–476.

Вклад авторов

Чебаков С. В. сформулировал постановку задачи для проведения исследования, предложил многокритериальную модель оптимизации и процедуру выбора.

Серебряная Л. В. разработала процедуру выбора и алгоритм поиска оптимального пути на графовой модели.

Authors' contribution

Chebakov S. V. formulated a problem statement for the study, proposed a multicriteria optimization model and a selection procedure.

Serebryanaya L. V. developed a selection procedure and an algorithm for finding the optimal path on a graph model.

Информация об авторах

Чебаков С. В., к. ф.-м. н., ст. н. с. Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

Серебряная Л. В., к. т. н., заведующая кафедрой информационных технологий и математики БИП – Университет права и социально-информационных технологий, доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 773-95-09
E-mail: l_silver@mail.ru
Серебряная Лия Валентиновна

Information about the authors

Chebakov S. V., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Serebryanaya L. V., Cand. of Sci., Head of the Department of Information Technologies and Mathematics BIP – University of Law and Social-Information Technologies, Associate Professor at the Information Technology Software Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 773-95-09
E-mail: l_silver@mail.ru
Serebryanaya Liya Valentinovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-93-100>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 061.68

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ VPN В СЕТИ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С. С. ВРУБЛЕВСКИЙ¹, Е. В. МАШКИН², А. А. БЫСОВ¹

¹Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «АГАТ-СИСТЕМ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Разработана математическая модель VPN в сети электросвязи специального назначения, позволяющая определить запас по пропускной способности для планируемых VPN-туннелей. В отличие от известных подходов оценки запаса по пропускной способности (поточковая модель VPN) предлагаемая модель учитывает класс передаваемого трафика. Модель является адекватной с точностью 0,95. Материалы, представленные в статье, являются оригинальными и могут быть использованы при планировании VPN-туннелей в сети электросвязи специального назначения.

Ключевые слова: сеть электросвязи специального назначения, виртуальная частная сеть, математическая модель, характеристики качества обслуживания, задержка передачи пакета.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Врублевский, С. С. Математическая модель VPN в сети электросвязи специального назначения / С. С. Врублевский, Е. В. Машкин, А. А. Бысов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 93–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-93-100>.

MATHEMATICAL MODEL OF VPN IN A SPECIAL PURPOSE TELECOMMUNICATION NETWORK

SERGEY S. VRUBLEVSKY¹, EVGENIY V. MASHKIN², ANATOLIY A. BYSOV¹

¹Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

²JSC “AGAT-SYSTEM” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15.02.2023

Abstract. The purpose of the article is to develop a mathematical model of VPN in communication networks of special purpose, which allows to determine the margin of throughput, for scheduled VPN-tunnels. In contrast to the well-known approaches to estimating the bandwidth margin (hose model of VPN), the developed model takes into account the class of transmitted traffic. The developed model is adequate with an accuracy of 0.95. The materials presented in the article are original and can be used when planning VPN-tunnels in a special purpose telecommunication network.

Keywords: communication networks of special purpose, virtual private network, mathematical model, quality of service characteristics, packet transmission delay.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vrublevsky S. S., Mashkin E. V., Bysov A. A. (2023) Mathematical Model of VPN in a Special Purpose Telecommunication Network. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 93–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-93-100> (in Russian).

Введение

В настоящее время в сети электросвязи специального назначения (СЭСН) наблюдается значительное увеличение объема передаваемых сообщений, что обусловлено появлением и активным использованием следующих услуг: видеоконференцсвязь, IP-телефония, электронная почта, электронные карты местности, базы данных. Это предполагает выполнение требований качества обслуживания пользователей в соответствии с классом трафика [1], а также организацию обособления потоков трафика с целью обеспечения информационной безопасности [2, 3]. Организация разграничения пакетного трафика в СЭСН осуществляется путем применения технологии VPN – создания VPN-туннелей [4].

Для математического описания VPN в сетях с коммутацией пакетов применяется потоковая модель VPN, разработанная в классе граф-комбинаторных моделей и подробно описанная в [5–7]. Данная модель описывает VPN-туннель потоком трафика на входе и на выходе каждой конечной точки сети и не требует определения полной информации о распределении трафика в виртуальной сети. Основным недостатком потоковой модели является ориентация на единственный показатель – пропускную способность, что предполагает обеспечение качества обслуживания пользователей за счет увеличения пропускной способности в сети. Данный подход не в полной мере может быть применим в СЭСН, так как ядро сети по-прежнему использует технологию коммутации каналов в качестве основной (скорость на отдельных участках сети может уменьшаться до пропускной способности, эквивалентной цифровому потоку $E1 = 2048$ кбит/с, что создает эффект «бутылочного горлышка», тем самым ухудшая показатели качества обслуживания пользователей). В режиме реального времени увеличить пропускную способность для создаваемых VPN-туннелей на участке сети, как правило, не представляется возможным.

Таким образом, на этапе планирования VPN возникает задача определения запаса по пропускной способности для VPN-туннелей с учетом обеспечения качества обслуживания пользователей (учитывая класс передаваемого трафика). В статье представлена математическая модель VPN в сети электросвязи специального назначения, разработанная в классе граф-комбинаторных моделей, позволяющая определить запас по пропускной способности для планируемых VPN-туннелей и отличающаяся от потоковой модели учетом класса передаваемого трафика.

Описание моделирования математической модели

Целью моделирования является определение запаса по пропускной способности для планируемых VPN-туннелей в СЭСН с учетом основного показателя обеспечения качества обслуживания – задержки передачи пакета. VPN-туннель характеризуется такими параметрами, как пропускная способность и максимально допустимая задержка передачи пакета. Организация VPN-туннеля требует резервирования части ресурса сети. Следовательно, перед его созданием необходимо предъявить требования к каналу связи, организованному между двумя любыми точками в сети:

$$VPN_{ij} = \{q_{ij}^{(VPN)}, k\}, \quad (1)$$

где $q_{ij}^{(VPN)}$ – требуемая пропускная способность VPN-туннеля; k – класс трафика, проходящего по VPN-туннелю, $k = \overline{1, 7}$ [8].

Исходными данными для математической модели являлись:

- граф $G = (X, A)$, где X, A – множество вершин и ребер;
- $Q = [q_{ij}]$ – матрица пропускных способностей каналов связи между маршрутизаторами, q_{ij} – пропускная способность канала связи между маршрутизаторами i и j ;
- $\Lambda_h = [\lambda_{ih}]$ – матрица-строка интенсивности трафика терминальных устройств, λ_{ih} – интенсивность трафика терминального устройства h ;
- $L = [l_{ij}]$ – матрица длин соединительных линий между маршрутизаторами, l_{ij} – длина соединительной линии между маршрутизаторами i и j ;
- $M = [\mu_x]$ – матрица-строка времени обработки одного пакета маршрутизатором, $\mu_x = \frac{1}{C_{обр\ x}}$ –

среднее время обработки одного пакета маршрутизатором x , равное обратной величине скорости обработки одного пакета;

- $\Phi = [\varphi_{hx}]$ – матрица связи терминальных устройств и маршрутизаторов, $\varphi_{hx} = 1$ – терминальное устройство h подключено к маршрутизатору x и $\varphi_{hx} = 0$ – не подключено;

– $\mathbf{B} = [\beta_{hh}]$ – матрица связи терминальных устройств, $\beta_{hh} = 1$, если терминальное устройство h передает пакеты терминальному устройству h , и $\beta_{hh} = 0$ – при отсутствии передачи данных между терминальными устройствами.

Оптимальные маршруты между любой парой маршрутизаторов образуют матрицу оптимальных маршрутов $\mathbf{P}_{\text{опт}}$

$$\mathbf{P}_{\text{опт}} = [p_{\text{опт}}^{(ij)}], \quad (2)$$

где $p_{\text{опт}}^{(ij)} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – оптимальный маршрут между маршрутизаторами i и j ; a_n – номер маршрутизатора в оптимальном маршруте.

Математическая модель учитывает следующие алгоритмы маршрутизации для поиска оптимальных маршрутов: Форда-Беллмана (моделирует протокол RIP), Дейкстры (моделирует протокол OSPF), Traffic Engineering (моделирует технологию MPLS) [9]. Имея матрицу оптимальных маршрутов (2) и матрицу пропускных способностей каналов связи между маршрутизаторами, получили матрицу минимальных пропускных способностей для каждого оптимального пути

$$\mathbf{Q}_{\text{опт}} = [q_{ij\text{опт}}], \quad (3)$$

где $q_{ij\text{опт}}$ – минимальная пропускная способность оптимального маршрута $p_{\text{опт}}^{(ij)}$, $q_{ij\text{опт}} = \min\{q_{a_1 a_2}^{(ij)}, q_{a_2 a_3}^{(ij)}, \dots, q_{a_n a_{n-1}}^{(ij)}\}$.

Путем проверки соединения терминальных устройств через матрицу \mathbf{B} , а также создаваемой ими интенсивности трафика Λ_h определена матрица интенсивности трафика, циркулирующего между маршрутизаторами i и j :

$$\Lambda_h = [\lambda_{ij}], \quad (4)$$

где λ_{ij} – интенсивность трафика, циркулирующего между маршрутизаторами i и j , при этом:

$$\begin{cases} \lambda_{ij} = \sum_{y=1}^X \sum_{z=1}^X \sum_{h=1}^H B'_{hh'} \forall i \neq j, h \neq h'; \\ \{a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n\} \in p_{\text{опт}}^{(yz)}; \\ a_k = i, a_{k+1} = j; \\ \varphi_{ha_1} = 1, \varphi_{ha_n} = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Выполнение условий (5) поясняется на рис. 1. А именно: интенсивность $B'_{hh'}$ прибавляется к сумме λ_{ij} , если в оптимальном маршруте $\{a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n\}$ содержится ребро $\{i, j\}$ и существует связь между терминальными устройствами h, h' и пограничными маршрутизаторами a_1, a_n соответственно.

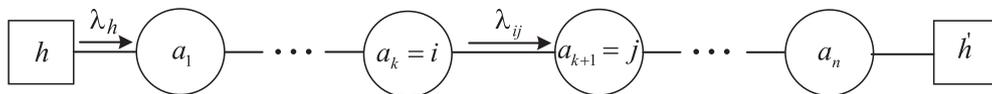


Рис. 1. Интенсивность трафика, циркулирующего между ребрами i и j
Fig. 1. Intensity of traffic circulating between edges i and j

Матрица интенсивности трафика между терминальными устройствами \mathbf{B}' определяется элементарным произведением матрицы связи терминальных устройств \mathbf{B} и матрицы интенсивности трафика терминальных устройств Λ

$$\mathbf{B}' = [B'_{hh'}], \quad (6)$$

где $B'_{hh} = B_{hh} \lambda_h$ – интенсивность трафика между терминальными устройствами.

Имея матрицу минимальных пропускных способностей для каждого оптимального пути (3) и матрицу интенсивности трафика между маршрутизаторами (4), определили матрицу запаса по пропускной способности

$$\Delta = \mathbf{Q}_{\text{опт}} - \Lambda = [q_{ij\text{опт}} - \lambda_{ij}], \quad (7)$$

где $q_{ij\text{опт}} - \lambda_{ij}$ – разница минимальной пропускной способности оптимального маршрута и интенсивности трафика между маршрутизаторами i и j .

С учетом требований по задержке передачи пакета выражение (7) примет вид:

$$\Delta^{(w_k)} = \begin{cases} \Delta = Q_{\text{опт}} - \Lambda |_{w^{(ij)} < w_k \forall k = \overline{1,7}}; \\ w^{(ij)} = w_{\text{во}}^{(ij)} + w_{\text{р}}^{(ij)} + w_{\text{обр}}^{(ij)} + w_{\text{о}}^{(ij)} + w_{\text{с}}^{(ij)}, \end{cases} \quad (8)$$

где w_k – пороговое значение задержки передачи пакета для определенного класса трафика.

Согласно предложенной модели, запас по пропускной способности равен разности матриц $Q_{\text{опт}}$ и Λ с учетом того, что достижение задержкой передачи пакета $w^{(ij)}$ порогового значения не позволяет использовать часть ресурса сети по пропускной способности ввиду невыполнения требований качества обслуживания. В свою очередь, потоковая модель (7) показывает, что ресурс сети по пропускной способности есть (на рис. 2 закрашенная область – ошибка определения запаса по пропускной способности).

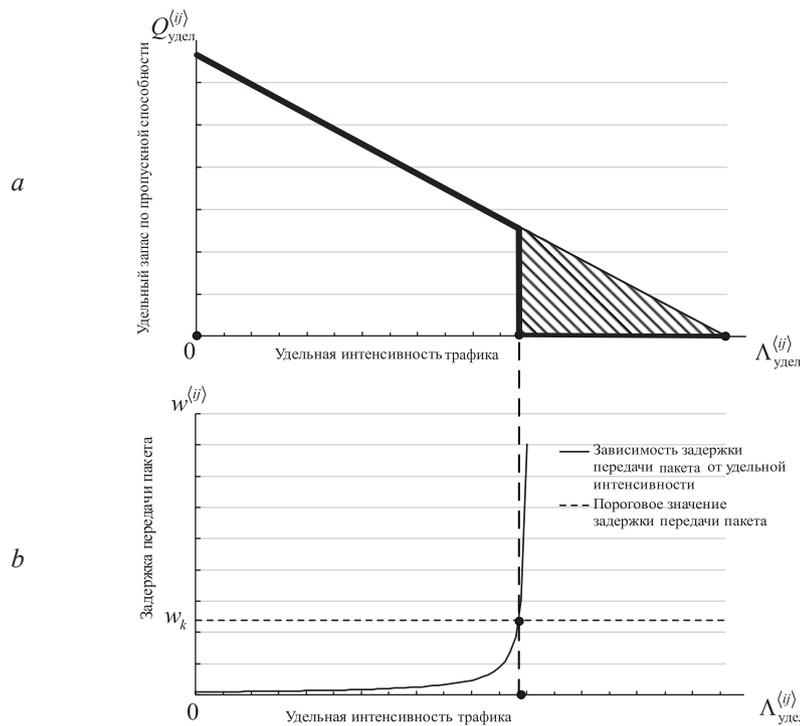


Рис. 2. Зависимости: *a* – удельного запаса по пропускной способности от удельной интенсивности трафика; *b* – задержки передачи пакета от удельной интенсивности трафика

Fig. 2. Dependences: *a* – specific bandwidth margin on specific traffic intensity; *b* – packet transmission delay depending on the specific traffic intensity

На рис. 2, *a* представлена зависимость удельного запаса по пропускной способности $Q_{\text{удел}}^{(ij)}$ от удельной интенсивности трафика $\Lambda_{\text{удел}}^{(ij)}$, на рис. 2, *b* – зависимость задержки передачи пакета $w^{(ij)}$ от $\Lambda_{\text{удел}}^{(ij)}$. Переход от абсолютных к удельным значениям пропускной способности и интенсивности обусловлен необходимостью учета различных способов маршрутизации для их сравнения между собой.

В (8) суммарная задержка передачи пакета $w^{(ij)}$ состоит из пяти составляющих:

$w_{\text{во}}^{(ij)} = w_{\text{во}}^{(i)} + w_{\text{во}}^{(j)}$ – задержка внеузловой обработки пакета, вносимая терминальными устройствами, подключенными через коммутаторы к пограничным маршрутизаторам i и j соответственно;
 $w_{\text{р}}^{(ij)}$ – задержка распространения пакета между маршрутизаторами i и j , равная сумме задержек распространения пакета $w_{\text{р}}^{\xi\beta} \in \mathbf{W}_{\text{р}}$ в оптимальном маршруте

$$w_{\text{р}}^{(ij)} = w_{\text{р}}^{a_1 a_2} + w_{\text{р}}^{a_2 a_3} + \dots + w_{\text{р}}^{a_{n-1} a_n} |_{a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbf{P}_{\text{опт}}} = \sum_{\xi=a_1^{(ij)}}^{a_n^{(ij)}} \sum_{\beta=a_2^{(ij)}}^{a_{n-1}^{(ij)}} w_{\text{р}}^{\xi\beta}, \quad (9)$$

где $w_{\text{р}}^{a_{n-1} a_n}$ – задержка распространения пакета между маршрутизаторами a_{n-1} и a_n в оптимальном маршруте;

$w_{\text{обр}}^{(ij)}$ – задержка обработки пакета маршрутизаторами, равная сумме задержек обработки пакета $w_{\text{обр } \xi\beta} \in \mathbf{W}_{\text{обр}}$ в оптимальном маршруте:

$$w_{\text{обр}}^{(ij)} = w_{\text{обр } a_1} + w_{\text{обр } a_2} + \dots + w_{\text{обр } a_n} = \sum_{\xi=a_1^{(ij)}}^{a_n^{(ij)}} w_{\text{обр } \xi}, \quad (10)$$

где $w_{\text{обр } a_n}$ – задержка обработки пакета маршрутизатором a_n в оптимальном маршруте;

$w_c^{(ij)}$ – задержка сериализации пакета между маршрутизаторами i и j , равная сумме задержек сериализации пакета $w_{c \xi\beta} \in \mathbf{W}_c$ в оптимальном маршруте

$$w_c^{(ij)} = w_{c a_1 a_2} + w_{c a_2 a_3} + \dots + w_{c a_{n-1} a_n} \Big|_{a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbf{P}_{\text{онт}}} = \sum_{\xi=a_1^{(ij)}}^{a_n^{(ij)}} \sum_{\beta=a_2^{(ij)}}^{a_{n-1}^{(ij)}} w_{c \xi\beta}, \quad (11)$$

где $w_{c a_{n-1} a_n}$ – задержка сериализации пакета между маршрутизаторами a_{n-1} и a_n в оптимальном маршруте;

$w_o^{(ij)}$ – задержка ожидания пакета в буфере маршрутизаторов на пути следования пакетов от пограничного маршрутизатора i к пограничному маршрутизатору j , равная сумме задержек ожидания пакета в буфере маршрутизаторов, находящихся в оптимальном маршруте:

$$w_o^{(ij)} = w_{o_1} + w_{o_2} + \dots + w_{o_{a_n}} = \sum_{\xi=a_1^{(ij)}}^{a_n^{(ij)}} w_{o \xi}, \quad (12)$$

где w_{a_n} – задержка ожидания пакета в буфере маршрутизатора a_n в оптимальном маршруте.

С учетом матриц интенсивности трафика (4) и оптимальных маршрутов (3) выражение (12) примет вид

$$w_o^{(ij)} = \frac{\lambda_{\text{вх}_1} b_1^2 (v_{a_1}^2 + v_{b_1}^2)}{2(1 - \lambda_{\text{вх}_1} b_1)} e^{-\frac{2(1 - \lambda_{\text{вх}_1} b_1)(1 - v_{a_1}^2)^2}{3\lambda_{\text{вх}_1} b_1 (v_{a_1}^2 + v_{b_1}^2)}} + \frac{\lambda_{\text{вх}_2} b_2^2 (v_{a_2}^2 + v_{b_2}^2)}{2(1 - \lambda_{\text{вх}_2} b_2)} e^{-\frac{2(1 - \lambda_{\text{вх}_2} b_2)(1 - v_{a_2}^2)^2}{3\lambda_{\text{вх}_2} b_2 (v_{a_2}^2 + v_{b_2}^2)}} + \dots + \frac{\lambda_{\text{вх}_k} b_k^2 (v_{a_n}^2 + v_{b_n}^2)}{2(1 - \lambda_{\text{вх}_k} b_k)} e^{-\frac{2(1 - \lambda_{\text{вх}_k} b_k)(1 - v_{a_n}^2)^2}{3\lambda_{\text{вх}_k} b_k (v_{a_n}^2 + v_{b_n}^2)}}, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{вх}_k} = \lambda_{11} + \lambda_{12} + \dots + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \dots + \lambda_{ij} = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^X \lambda_{ij} \Big|_{\substack{i=a_1 \\ j=a_n \\ k=a_k}}$ – интенсивность трафика, поступающего на вход маршрутизатора k от всех подключенных к нему маршрутизаторов в оптимальном маршруте (рис. 3).

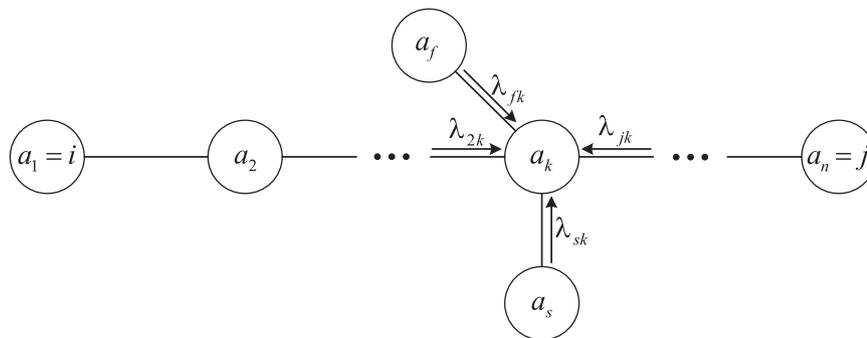


Рис. 3. Интенсивность трафика, поступающего на вход маршрутизатора $a_k \in \mathbf{P}_{\text{онт}}$
Fig. 3. Intensity of traffic arriving at the input of the router $a_k \in \mathbf{P}_{\text{онт}}$

Интенсивность $\lambda_{\text{вх}_k}$ является элементом матрицы интенсивностей трафика, поступающих на вход маршрутизатора x :

$$\Lambda_{\text{вх}} = [\lambda_{\text{вх}_1} \quad \lambda_{\text{вх}_2} \quad \dots \quad \lambda_{\text{вх}_k} \quad \dots \quad \lambda_{\text{вх}_x}]. \quad (14)$$

VPN-туннель VPN_{ij} может быть организован при выполнении условий:

$$\begin{cases} q_{ij}^{(VPN)} \leq \Delta_{ij}^{(w_k)} \forall i, j; \\ w_k \geq w^{(ij)} \forall i, j. \end{cases} \quad (15)$$

Адекватность аналитической модели оценивали путем проверки выполнения критерия Вилкоксона (гипотезы об однородности двух эмпирических выборок) для интенсивности трафика, измеренной на участке телекоммуникационной сети, и трафика, полученного при помощи математической модели данного участка сети. Аналитическая модель адекватна с вероятностью 0,95.

Оценка точности математической модели

Для оценки точности модели введен следующий показатель – ошибка определения запаса по пропускной способности для планируемых VPN-туннелей $k_{\text{ош}}$ (далее – ошибка). Так как ошибка зависит от интенсивности трафика, ее оценку рационально представить в обобщенном виде как отношение площади фигуры под кривой до достижения допустимого порогового значения задержки передачи и площади фигуры под кривой после достижения допустимого порогового значения задержки передачи на отрезке

$$k_{\text{ош}} = \frac{S_w}{S_{\text{без } w}} \cdot 100 \% = \frac{S_2}{S_1 + S_2} \cdot 100 \%. \quad (16)$$

При разработке математической модели было исследовано влияние на ошибку следующих факторов:

- изменение интенсивности трафика терминальных устройств;
- изменение пропускной способности каналов связи между маршрутизаторами;
- изменение допустимой задержки передачи пакета для определенного класса трафика;
- изменение длины передаваемого пакета;
- выбор способа маршрутизации (RIP, OSPF, TE).

Анализ зависимостей позволил сформировать табл. 1, характеризующую границы ошибки при изменении воздействующих факторов для различных способов маршрутизации.

Таблица 1. Математическое ожидание ошибки для различных способов маршрутизации
Table 1. Mathematical expectation of error for various routing methods

Способ маршрутизации / Routing method	Значение ошибки при изменении, % / Change error value, %	
	минимальное / minimum	максимальное / maximum
пропускных способностей каналов связи между маршрутизаторами		
RIP	7,575	15,24
OSPF	10,434	21,007
TE	63,179	81,252
допустимой задержки передачи пакета для классов трафика (в соответствии с [3])		
RIP	10,91	11,056
OSPF	25,264	25,598
TE	60,522	60,605
длины передаваемого пакета		
RIP	10,967	11,896
OSPF	25,561	27,162
TE	71,531	74,183

Из табл. 1 следует, что ошибка определения запаса по пропускной способности, полученная на основе предлагаемой модели, в сравнении с потоковой моделью изменяется в широких пределах – от 7,6 до 81,3 %. Основным фактором, влияющим на ошибку, является выбор способа

маршрутизации пакетов. На основе проведенных исследований и экспериментов можно сделать следующие выводы по планированию VPN-туннелей в СЭСН:

- для применяемых в настоящее время в СЭСН способов маршрутизации (RIP и OSPF) значение ошибки определения запаса по пропускной способности для планируемых VPN-туннелей составляет 7,6–15,2 % при использовании протокола RIP и 10,4–27,2 % – протокола OSPF;
- для перспективной технологии TE, реализующей равномерное распределение нагрузки на сеть, ошибка составит 60,5–81,3 %.

Заключение

1. Применять классическую потоковую модель для планирования VPN-туннелей в сети электросвязи специального назначения следует при отсутствии интерактивного трафика в VPN. В условиях преобладания интерактивного трафика потоковая модель не учитывает требований обеспечения качества обслуживания, что приводит к ошибочной оценке запаса по пропускной способности для планируемых VPN-туннелей.

2. Предлагаемая модель позволяет компенсировать ошибку определения запаса по пропускной способности для интерактивного трафика в VPN в интервале от 7,6 до 15,2 % при использовании протокола RIP, от 10,4 до 27,2 % – протокола OSPF, от 60,5 до 81,3 % – технологии TE.

Список литературы

1. Чуйков, В. Б. Требования по обеспечению качества обслуживания в мультисервисных сетях связи специального назначения / В. Б. Чуйков, А. Ю. Живодерников // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: матер. круг. столов VI Межрегион. науч.-практ. конф., Севастополь, 22–26 сент. 2020 г. Севастополь: Севастоп. гос. ун-т, 2020. С. 66–68.
2. Бокова, О. И. Формирование требований к защищенной информационно-телекоммуникационной инфраструктуре сети связи специального назначения / О. И. Бокова, С. В. Канавин, Н. С. Хохлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 3. 15 с.
3. Gunleifsen, H. Dynamic Setup of IPsec VPNs in Service Function Chaining / H. Gunleifsen, T. Kemmerich, V. Gkioulos // *Computer Networks*. 2019. Vol. 160. P. 77–91.
4. Современные и перспективные информационные и телекоммуникационные технологии на сетях связи специального назначения / В. Н. Лукьянчик [и др.] // Труды ЦНИСС. Санкт-Петербургский филиал. 2022. Т. 1, № 13. С. 52–57.
5. Росляков, А. В. Разработка моделей и методов анализа виртуальных частных сетей с учетом особенностей их практической реализации / А. В. Росляков. Самара: Поволжский гос. ун-т телекоммун. и информ., 2008. 32 с.
6. Thabti, B. Evolutionary Algorithm for Provisioning VPN Trees Based on Pipe and Hose Workload Models / B. Thabti, H. Youssef, A. Meddeb // 2011 Seventh International Conference on Natural Computation, Shanghai, China, 2011. P. 2058–2064.
7. Thabti, B. From Constant Traffic Matrices to Hose Workload Model for VPN Tree Design / B. Thabti, A. Lourimi, H. Youssef // 2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS). Rome, Italy, 2012. P. 1–6.
8. Требования к сетевым показателям качества для служб, основанных на протоколе IP: Рекомендация МСЭ-Т Y.1541 (12/2011). 16 с.
9. Chishti, Mohammad Ahsan. Performance Analysis of Traffic Engineering (TE) in IPv6 with IPv4 Over Multi Protocol Label Switching (MPLS) / Mohammad Ahsan Chishti, Ajaz Hussain Mir // *International Journal of Computing and Network Technology*. 2015. Vol. 3, No 1. P. 1–7.

References

1. Chuykov V. B., Zhivodernikov A. Yu. (2020) Requirements for Ensuring the Quality of Service in Multiservice Communication Networks for Special Purposes. *Perspective Directions of Development of Domestic Information Technologies: Mater. Circle. Tables VI Interregional. Scientific-Practical. Conf., Sevastopol, 22–26 Sept. 2020*. Sevastopol, Sevastopol State University. 66–68 (in Russian).
2. Bokova O. I., Kanavin S. V., Khokhlov N. S. (2022) Formation of Requirements for a Secure Information and Telecommunication Infrastructure of a Special-Purpose Communication Network. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 10 (3), 15 (in Russian).
3. Gunleifsen H., Kemmerich, T., Gkioulos V. (2019) Dynamic Setup of IPsec VPNs in Service Function Chaining. *Computer Networks*. 160, 77–91.
4. Luk'yanchik V. N., Seleznev A. V., Mel'nik V. N., Ivanets V. M., Fedorov A. V. (2022) Modern and Promising Information and Telecommunication Technologies on Special-Purpose Communication Networks. *Proceedings of TsNISS. St. Petersburg Branch*. 1 (13), 52–57 (in Russian).

5. Roslyakov A. V. (2008) *Development of Models and Methods for the Analysis of Virtual Private Networks, Taking into Account the Peculiarities of their Practical Implementation*. Samara, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics. 32 (in Russian).
6. Thabti B., Youssef H., Meddeb A. (2011) Evolutionary Algorithm for Provisioning VPN Trees Based on Pipe and Hose Workload Models. *2011 Seventh International Conference on Natural Computation, Shanghai, China*. 2058–2064.
7. Thabti B., Lourimi A., Youssef H. (2012) From Constant Traffic Matrices to Hose Workload Model for VPN Tree Design. *2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)*. Rome, Italy. 1–6.
8. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/2011). *Network Performance Objectives for IP-Based Services*. 16 (in Russian).
9. Chishti Mohammad Ahsan, Mir Ajaz Hussain (2015) Performance Analysis of Traffic Engineering (TE) in IPv6 with IPv4 Over Multi Protocol Label Switching (MPLS). *International Journal of Computing and Network Technology*. 3 (1), 1–7.

Вклад авторов

Врублевский С. С. разработал математическую модель VPN в сети электросвязи специального назначения, определяющую запас по пропускной способности для планирования VPN-туннелей с учетом класса передаваемого трафика.

Машкин Е. В. осуществил постановку задачи для разработки математической модели.

Бысов А. А. принял участие в определении ключевых особенностей СЭСН при планировании VPN-туннелей.

Authors' contribution

Vrublevsky S. S. developed a mathematical model of VPN in a communication network of special purpose to scheduled a network resource as a throughput for planning VPN-tunnels with according transmitted traffic class.

Mashkin E. V. carried out the problem statement for the development of a mathematical model.

Bysov A. A. took part in defining the key features of CNSP when planning VPN tunnels.

Сведения об авторах

Врублевский С. С., адъюнкт кафедры связи Военной академии Республики Беларусь

Машкин Е. В., к. т. н., доцент, заместитель директора по развитию – первый заместитель директора ОАО «АГАТ-СИСТЕМ»

Бысов А. А., к. т. н., доцент, начальник цикла кафедры связи Военной академии Республики Беларусь

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, просп. Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь
Тел.: +375 33 690-98-15
E-mail: sergeyvrublevsky0@gmail.com
Врублевский Сергей Сергеевич

Information about the authors

Vrublevsky S. S., Adjunct at the Department of Communications of the Military Academy of the Republic of Belarus

Mashkin E. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Deputy Director for Development – First Deputy Director of the JSC “AGAT-SYSTEM”

Bysov A. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Communications of the Military Academy of the Republic of Belarus

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220
Military Academy of the Republic of Belarus
Tel.: +375 33 690-98-15
E-mail: sergeyvrublevsky0@gmail.com
Vrublevsky Sergey Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-101-109>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.684.6; 004.021

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЕМАТИЧЕСКИХ САЙТОВ

И. И. ПИЛЕЦКИЙ, М. П. БАТУРА, Н. А. ВОЛОРОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 10.04.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Одно из современных направлений получения информации для принятия обоснованных решений – анализ данных из открытых интернет-источников и СМИ, содержащих множество публикаций. Критически важно не только получение достоверной информации, но и время для ее анализа. Разработана и апробирована комплексная методология быстрого построения прототипа системы комплексного анализа тематических сайтов. Создана технология взаимосвязанных методов, методологий и инструментов по построению графовой базы данных, графа знаний, анализа данных с использованием методов и моделей машинного обучения с предоставлением аналитических результатов пользователям. Разработанные технологии могут применяться для анализа данных известных мировых сайтов с целью построения прототипа системы комплексного анализа информации интернет-источников.

Ключевые слова: система комплексного анализа, RDF-схема, RDF-словари и онтологии, машинное обучение, графовые базы данных, графовые алгоритмы, PageRank.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность студентам Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники П. А. Зорко и О. А. Кулевич за апробацию технологических решений.

Для цитирования. Пилецкий, И. И. Методология построения прототипа системы комплексного анализа данных тематических сайтов / И. И. Пилецкий, М. П. Батура, Н. А. Волорова // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 101–109. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-101-109>.

METHODOLOGY FOR BUILDING A PROTOTYPE SYSTEM FOR COMPLEX DATA ANALYSIS OF THEMATIC SITES

IVAN I. PILETSKI, MIKHAIL P. BATURA, NATALIA A. VOLARAVA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10.04.2023

Abstract. One of the modern directions of obtaining information for making informed decisions is the analysis of data from open Internet sources, the analysis of media containing hundreds of thousands of publications. It is critically important not only to obtain reliable information, but also the time needed to obtain and analyze it. The purpose of the research in this work is the development and testing of a complex methodology for quickly building a prototype of a system for complex analysis of thematic sites. A technology of interconnected methods, methodologies, and tools for building a graph database, a knowledge graph, data analysis using methods and models of machine learning with the provision of analytical results to users has been created. The main task of this work is to use these technologies to analyze data from well-known world sites in order to build a prototype of a systems for complex analysis of data from Internet sources.

Keywords: complex analysis system, RDF schema, RDF dictionaries and ontologies, machine learning, graph databases, graph algorithms, PageRank.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors are grateful to the students of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics P. A. Zorko and O. A. Kulevich for approbation of technological solutions.

For citation. Piletski I. I., Batura M. P., Volarava N. A. (2023) Methodology for Building a Prototype System for Complex Data Analysis of Thematic Sites. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 101–109. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-101-109> (in Russian).

Введение

Общепринятое представление данных в форме HTML не позволяет отразить семантику сайта и значения данных. Однако во многих ситуациях важно иметь многомерные данные, такие как статистика, различные документы и публикации, чтобы их можно было связать с соответствующими наборами данных и концепциями для получения знаний о конкретной предметной области. Это аналогично, как получать знания, используя информацию и ее интерпретацию из конкретной базы данных (БД).

Одно из сложных современных направлений – предоставление знаний с помощью специальных глобальных словарей предметных областей, классификаторов, мета-описаний, специальных языков и методологий их применения. Данная методология используется для создания и описания содержимого известных сайтов: Wikipedia, DBpedia, TerMef and French Bioloinc Portal, TerMef, BIOLOINC, WikiData, Scientific Research Publishing, IEEE Xplore, SpringerOpen, научной электронной библиотеки «КиберЛенинка», сайта с научными публикациями Semantic Scholar, крупных организаций и др. Многие сайты применяют специальную абстрактную модель описания ресурса Resource Description Framework (RDF – среда описания ресурса, имеет вид тройки «субъект – предикат (или свойство) – объект (значение свойства)»¹. Такой подход позволяет выполнять описание знаний в тематических предметных словарях и обмениваться этими знаниями с другими сайтами. RDF-ресурс может быть представлен любой сущностью – информационной или неинформационной. Например, это может быть описание некоторого сайта или реального объекта.

К наиболее распространенным RDF-словарям относятся: FOAF (Friend-of-a-Friend) – словарь для описания людей, их деятельности, отношения с другими людьми и объектами; SKOS (Simple Knowledge Organization System) – словарь для представления таксономий и слабоструктурированных знаний; DC (Dublin Core) – определяет общие атрибуты метаданных; BIBO (Bibliographic Ontology) – используется как онтология цитирования, классификации документов; SIOC (Semantically-Interlinked Online Communities) – семантическая технология соединенных онлайн-сообществ; DOAP (Description of a Project); Music Ontology. RDF-словари и онтологии OWL (Web Ontology Language – язык представления веб-онтологий) применяют абстрактную модель RDF- и RDFS-описания (RDFS – RDF Schema) ресурса. Онтология – это конкретное формальное представление того, что означают термины в той области, в которой они используются. RDF-информация может быть представлена в нескольких форматах – Turtle, N-Triples, JSON-LD, RDF/XML, TriG и N-Quads, TriG*². Данные с таких веб-сайтов можно использовать для быстрого построения прототипа графовой БД для дальнейшего более глубокого анализа данных сайта, что и применено в статье.

Для веб-сайтов, которые хранят данные в JSON-LD, в коде страницы можно найти скрипт JSON-LD. Такой сайт можно сериализовать в графовую базу данных на основе информации, хранящейся в формате JSON. Кроме RDF и JSON можно сериализовать и другие типы данных. Так, данные на общедоступном популярном сайте Wikipedia хранятся в формате Turtle и тоже могут быть сериализованы в графовую БД. Для сайта Wikidata информация о данных хранится на самом сайте.

Именами сущностей RDF являются имена классов, предикатов, индивидуумов, представленные URI (Uniform Resource Identifier) – универсальным идентификатором ресурса, который идентифицирует логический или физический ресурсы. Обычно они выражаются использованием компактной записи, и префикс определяет URI пространства имен. RDF представляет собой абст-

¹ The RDF Data Cube Vocabulary (w3.org).

² https://www.w3.org/2013/dwbp/wiki/RDF_AND_JSON-LD_UseCases.

рактную модель, обеспечивающую способ разбиения знаний на дискретные части, и позволяет обмениваться информацией. Для описания групп взаимосвязанных ресурсов и отношений между ресурсами применяется RDFS³, для отношений между людьми можно использовать schema.org. Расширение RDFS фиксирует понятие встроенной тройки, на которую ссылаются с помощью строк <<... >>, а семантика ребра следует за ними в терминах онтологии схемы (xsd:date). Например, <<:boy :hasGirlfriend :girl>> :startDate «2014-04-14»^^xsd:date. Данная нотация прямо связана с понятием «граф знаний», что позволяет генерировать графовые базы данных, знаний и строить по запросам графы знаний. Для доступа к данным таких сайтов (в формате Turtle) можно использовать специально разработанный язык SPARQL Protocol and RDF Query Language⁴. Но гораздо важнее построить графовую БД с целью комплексного и глубокого анализа данных.

Графовая база данных и IT-среда для анализа данных

Существуют различные методы формализации знаний. В статье рассматриваются сайты, которые используют описание ресурса с помощью семантических троек RDF. Данные методология и технология описания сайтов позволяют выполнить генерацию (построение) графовой БД из троек RDF. Такая тематическая графовая БД содержит базу знаний сайта в виде графа знаний, что позволяет применять различные аналитические алгоритмы машинного обучения (ML) для более глубокого анализа данных сайта [1–3].

IT-среда и технология ее применения позволяют построить графовую БД тематического сайта. В качестве основных компонент IT-среды для построения графовой БД веб-сайта используются графовая система управления базами данных Neo4j Desktop⁵ и ее расширения. Это специальные плагины Neosemantics (n10s), APOC (Awesome Procedures on Cypher) и GDS (Graph Data Science Library), а также вспомогательные функции, написанные на языках Python и Cypher.

Узлы в графе RDF могут быть либо ресурсами, представленными уникальным идентификатором ресурса URI (например, общеизвестные URL-адреса), литералами (например, такими же, как в XML), либо вспомогательными пустыми узлами. Типы ребер называются предикатами. При построении графовой БД выполняется преобразование троек RDF («S-субъект – P-предикат – O-объект») в графовую БД с узлами, отношениями и свойствами узлов и отношений. Рассмотрим примеры демонстрации принятых технологических решений.

Пример 1. Построение графовой базы данных из данных сайта⁶ (данные хранятся в RDF)

При выполнении специального запроса получим граф, изображенный на рис. 1. Граф содержит четыре узла трех различных типов (артист, альбом, песня) и три связи двух видов (композитор, вхождение песни в альбом (в свойствах связи номер дорожки песни в альбоме)). У каждого из узлов и отношений свои уникальные id и uri.

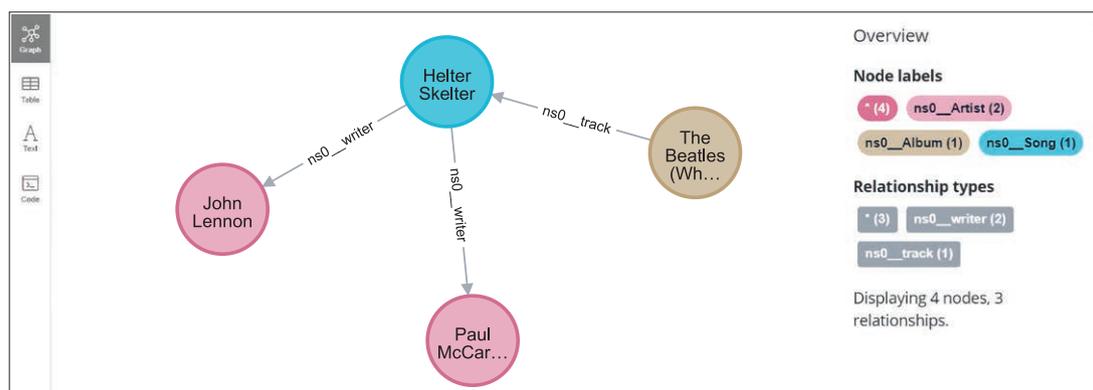


Рис. 1. Представление сайта, полученное по ссылке⁶
Fig. 1. Representation of the site obtained from the link⁶

Предметная область системы комплексного анализа искусственного интеллекта (СКА ИИ) включает в себя следующие сущности и их свойства:

³ <https://www.w3.org/2000/01/rdf-schema>, schema.org (<https://schema.org/docs/gs.html>).

⁴ <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-protocol/>.

⁵ <https://neo4j.com/product/neo4j-graph-database/>.

⁶ <https://github.com/jbarrasa/datasets/blob/master/rdfstar/beatles-hs.ttl>.

- User (sch_Users): name – имя пользователя системы СКА ИИ и его характеристики;
- Article (sch_Article): title – название статьи, year – год выпуска статьи, venue – награды, n_citation – цитирование статьи, abstract – описание статьи, theme – тематика статьи, references – ссылки, pagerank – рейтинг статьи по pagerank;
- Author (sch_Person): name – имя и фамилия автора, articles – статьи, которые принадлежат автору, popularity – количество статей этого автора, pagerank – рейтинг автора по pagerank.

Структура графовой БД, которая отражает предметную область разрабатываемой системы, приведена на рис. 2.

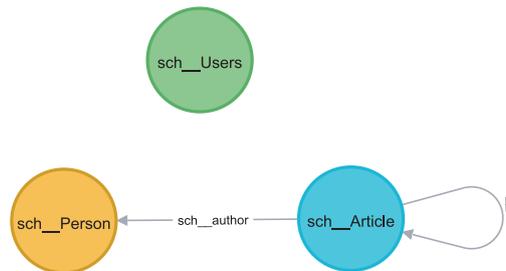


Рис. 2. Структура графовой базы данных для анализа публикаций
Fig. 2. Structure of graph database for publications analysis

Начальная структура БД имеет следующие свойства: sch_author – связывает статью и автора, который написал ее, sch_references – связывает первую и последующую статью, на которую ссылается первая статья. Для применения технологических решений используются данные из предметной области широко известных сайтов: IEEE Xplore, научной электронной библиотеки «КиберЛенинка», Semantic Scholar и SpringerOpen.

Пример 2. Построение графа свойств на основе данных, встроенных в веб-страницы (JSON-LD)

Рассмотрим сайт со статьями на научные темы Semantic Scholar и технологические решения для заполнения данными графовой базы данных СКА ИИ, структура которой приведена на рис. 2. Как правило, данные, нужные для сериализации и построения графовой БД, находятся в коде страницы сайта в script-элементе с типом application/ld+json. Для извлечения информации с веб-страницы используется процедура библиотеки АРОС – арос.load.html, а для визуализации статей сайта по тематике Big Data и анализа – плагин Neosemantics и специальный запрос.

На рис. 3 приведен скриншот общего представления обновленной графовой базы данных СКА ИИ, полученной в результате загрузки данных из указанного сайта. Типы узлов и связей получены с этого сайта с помощью технологии быстрого построения тематической графовой БД. После загрузки данных образовались узлы и связи со свойствами, JSON-LD использует schema.org³:

- узлы: Organization – организация; Article – статья или публикация; ScholarlyArticle – научная статья или публикация; Person – человек, в случае со статьями – автор или издатель статьи; ListItem – является элементом какого-то списка; BreadcrumbList – это ListItem, состоящий из цепочки связанных веб-страниц; ImageObject – изображение чего-то (графический файл); _GraphConfig – содержит в себе все настройки и конфигурацию плагина Neosemantics; Resource – все остальные узлы, которые не попали под какую-либо из категорий;

- связи: sameAs – идентичные элементы; image – URL-адрес или полностью описанный ImageObject; author – автор публикации или статьи; publisher – издатель; mainEntityOfPage – указывает на страницу с основным описываемым объектом; item – данные какой-то сущности; itemListElement – какая-то сущность списка; url – URL-адрес элемента; contentUrl – URL-адрес на медиаобъект.

Созданная IT-среда Neo4j Desktop и технологические решения позволяют анализировать, какие веб-страницы и элементы связаны друг с другом и какой связью, а также объединять несколько похожих графовых баз данных (к примеру, различные сайты со статьями) в одну графовую БД. Так, в графовую базу данных СКА ИИ к данным Semantic Scholar были добавлены данные с сайта SpringerOpen. Полученную тематическую графовую БД этого сайта (или сайтов) будем использовать для дальнейшего анализа данных с применением графа знаний и алгоритмов ML. Узлы, ребра графовой БД и граф знаний с помощью технологии embedding (вложений) преобразовываются в векторное представление некоторого пространства для применения алгоритмов ML.

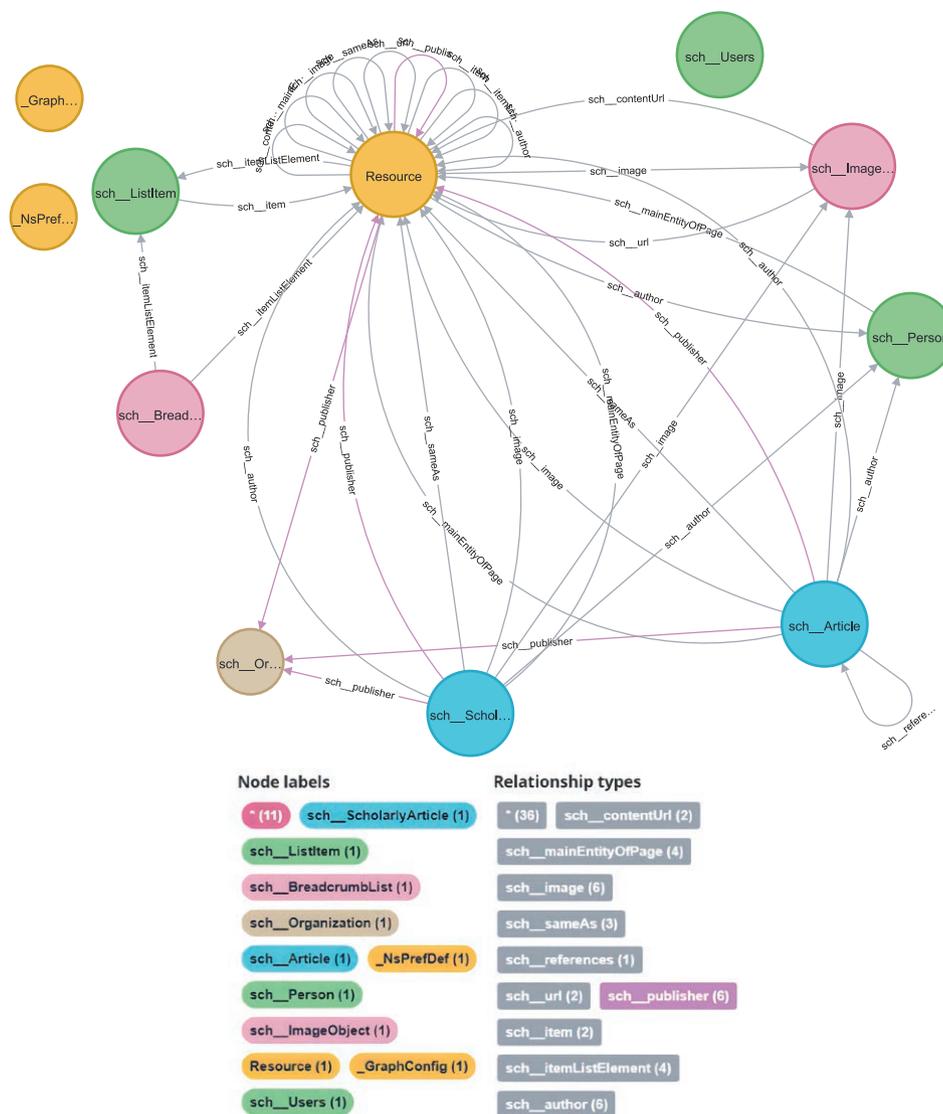


Рис. 3. Скриншот общего представления обновленной графовой базы данных
Fig. 3. Screenshot of general representation of the updated graph database

Граф знаний

Граф знаний (KG – Knowledge Graph) – ориентированный граф, узлы которого – это сущности и литеральные значения (литералы), а ребра – отношения между этими сущностями [4]. KG – естественная модель данных во многих реальных ситуациях. KG фиксирует все полезные отношения и с помощью вложения (embedding) графа объединяет огромное количество знаний (области) в векторное представление более низкого измерения. Вложения графов – это проекции узлов и ребер в непрерывное низкоразмерное пространство.

Известные примеры баз и графов знаний – Google Knowledge Graph, DBpedia (огромный набор данных из 228 млн вещей и онтологии – люди, места, фильмы, книги, организации, виды, болезни и т. д.), Geonames (содержит 12 млн географических объектов), Wordnet (лексическая база данных английского языка, содержащая определения и синонимы), FactForge (открытые данные и новостные статьи о людях, об организациях и о местах), Wikidata (междометный граф знаний, содержит описание множества фактов с богатым контекстом и ссылками).

Примеры графов знаний, где используются графовая база знаний СКА ИИ, и специальные запросы к БД приведены ниже.

Пример 3. Найти все статьи, которые написал Хонг Мэй

Полученный граф знаний, представленный на рис. 4, позволяет определить тематику публикаций ученого с мировым именем.

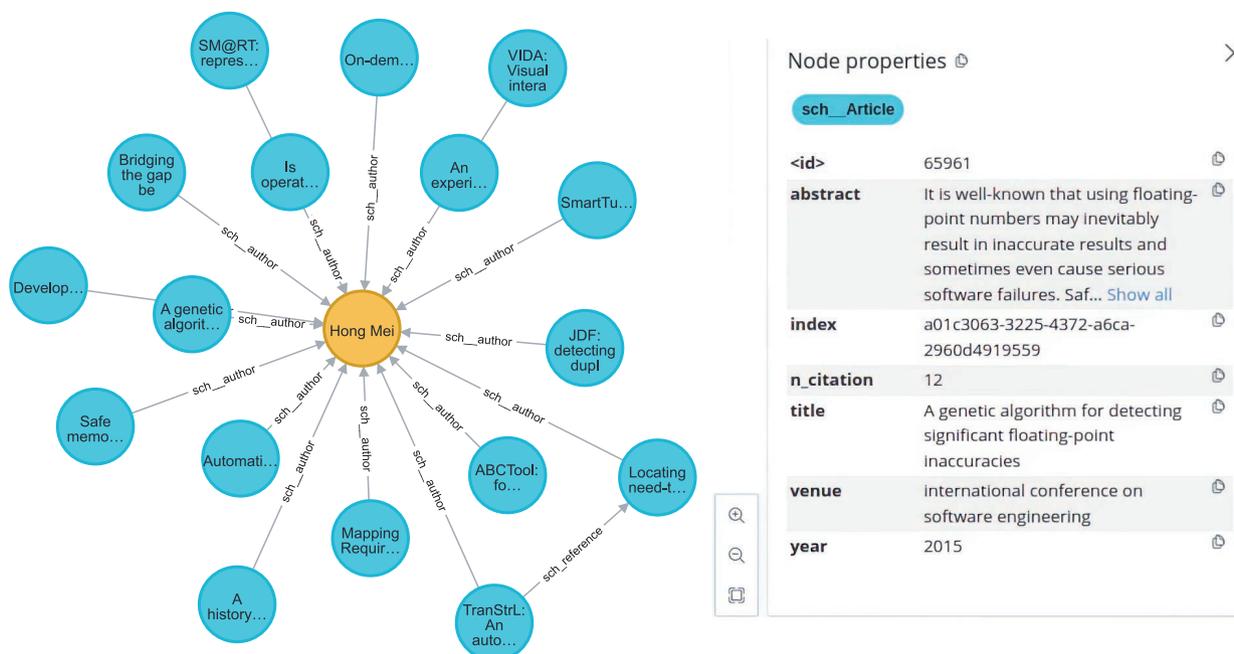


Рис. 4. Статьи, написанные автором Хонг Мэйем, и тематика публикаций
Fig. 4. Articles written by the author Hong Mei and topics of publications

Запрос к базе данных следующий:

```
MATCH (ar:sch__Article)-[:sch__author]->(ath:sch__Person)
WHERE ath.name = 'Hong Mei'
RETURN ar, ath.
```

Для статьи ABCTool на рис. 4 справа приведены уточненные характеристики.

Пример 4. Поиск авторов по названию статьи

Запрос к базе данных следующий:

```
MATCH (ar:sch__Article)-[:sch__author]->(ath:sch__Person)
WHERE ar.sch__name = 'Big Data Storage'
RETURN ar, ath.
```

Результат: статья 'Big Data Storage' написана авторами Jörg Daubert, Herman Ravkin, Mario Lischka, M. Strohbach. Скриншот результата поиска авторов по названию статьи изображен на рис. 5.

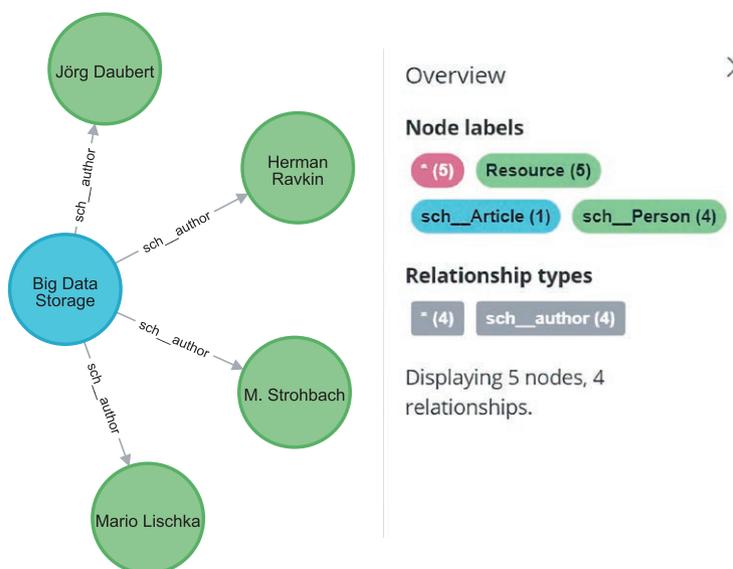


Рис. 5. Скриншот результата поиска авторов по названию статьи
Fig. 5. Screenshot of authors search result by article title

Пример 5. Издание Journal of Big Data сайта SpringerOpen и статьи, опубликованные в нем
Скриншот результата поиска издания Journal of Big Data и статей, опубликованных в нем, приведен на рис. 6. Выделенная статья отражает тематику публикации.

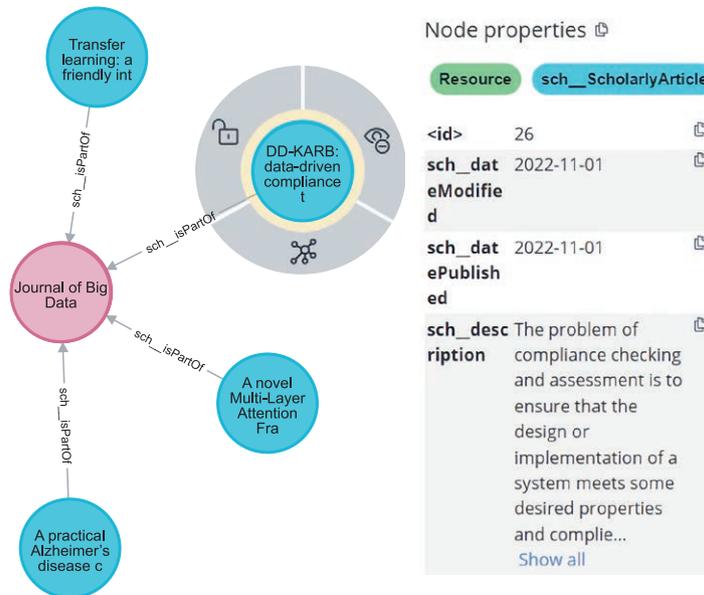


Рис. 6. Скриншот результата поиска издания Journal of Big Data и статей, опубликованных в нем
Fig. 6. Screenshot of the search result of the Journal of Big Data and articles published in it

Анализ данных

В качестве предметной области тематических сайтов в СКА ИИ можно использовать сайты научных публикаций, такие как Semantic Scholar, SpringerOpen, IEEE Xplore, «КиберЛенинка», и графовую базу данных, приведенную на рис. 2. Анализ наиболее важных статей и авторов выполнен с помощью алгоритма PageRank из библиотеки Graph Data Science. Вычисленное значение нормализуется и записывается в свойство pagerank вершины ArticlesGraph (рис. 2), т. е. свойство pagerank определено для всех публикаций в рассматриваемой БД. Фрагмент гистограммы популярности статей приведен на рис. 7: по оси X – название статей, по оси Y – их популярность.

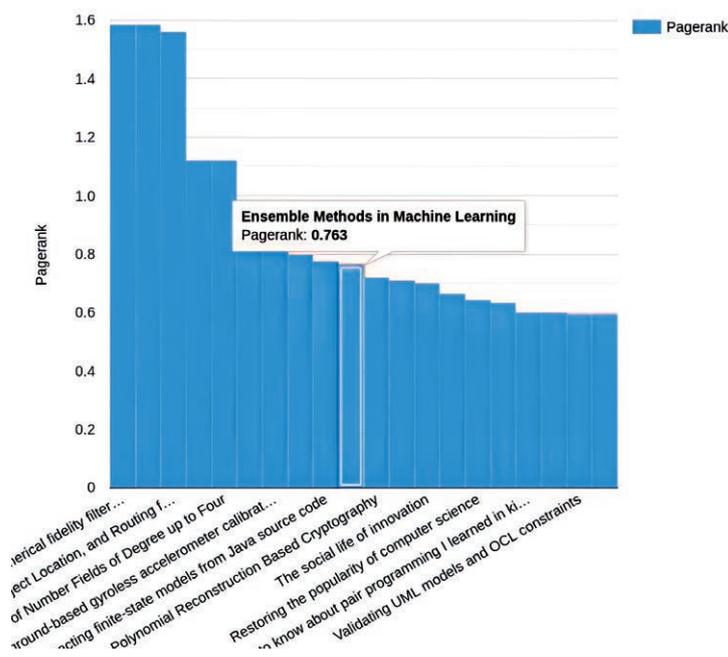


Рис. 7. Фрагмент гистограммы популярности статей
Fig. 7. Fragment of Histogram of articles popularity

Пример 6. Совместное применение графовых технологий и алгоритмов машинного обучения – на наборе данных европейских дорог (Neo4j Desktop⁵)

Для демонстрации технологических решений совместного применения вложений и ML используется набор данных европейских дорог⁷, который содержит 894 города и 1250 дорог (дополнительная информация по технологическим решениям приведена в статье «Граф знаний и машинное обучение как IT-среда интеллектуального анализа данных интернет-источников»⁸). Структура загружаемых данных в графовую БД выглядит следующим образом: *road_number, origin_country_code, origin_reference_place, destination_country_code, destination_reference_place, distance, watercrossing*.

Для городов (узлы – Place) строится векторное представление, что позволяет применять алгоритмы ML для более глубокого анализа данных в графовых БД. На рис. 8 приведен результат выполнения ML-алгоритма кластеризации.

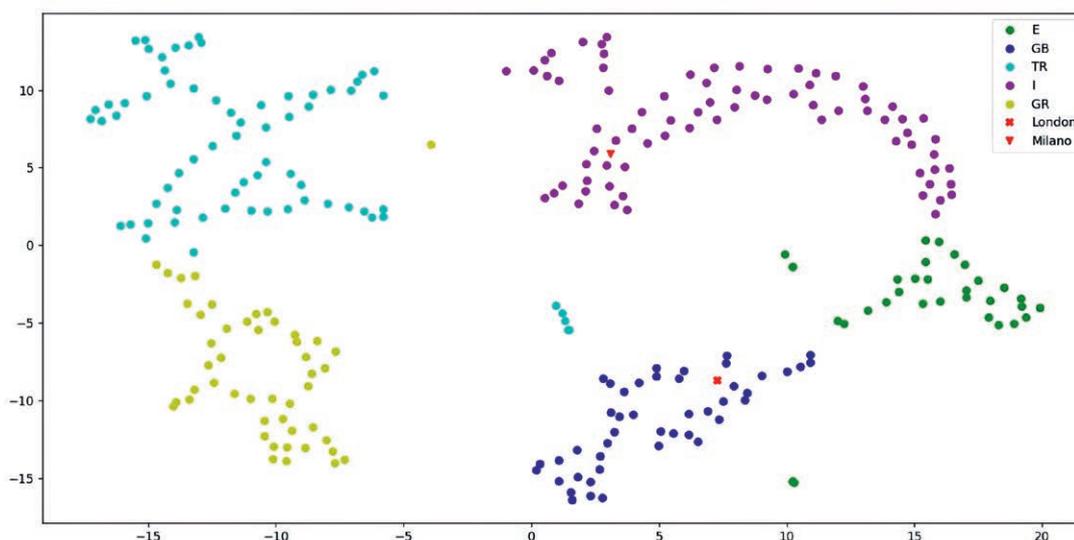


Рис. 8. Результат работы алгоритма кластеризации
Fig. 8. The result of the clustering algorithm operation

Заключение

1. Разработана и апробирована комплексная методология последовательного применения взаимосвязанных методов и инструментов по построению графовой базы данных, графа знаний, анализа данных с использованием векторного преобразования графовых данных, методов и моделей машинного обучения и предоставления аналитических результатов пользователям. Создана и апробирована IT-среда для быстрого построения тематической графовой базы данных из данных сайтов, продемонстрировано применение графа знаний и показано, что это естественная модель данных во многих реальных ситуациях.

2. Применена технология преобразования (embedding) графов (графовых данных) в непрерывное низкоразмерное векторное представление, что позволяет анализировать содержимое графовых баз данных с помощью алгоритмов машинного обучения.

3. Предлагаемая комплексная методология применяется при создании системы комплексного анализа искусственного интеллекта в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники для анализа публикаций известных мировых сайтов.

Список литературы / References

1. Diestel R. (2017) *Graph Theory*. Berlin, Springer-Verlag Publ.
2. Needham M., Hodler Amy E. (2019) *Graph Algorithms*. Sebastopol, O'Reilly Media.

⁷ <https://raw.githubusercontent.com/neo4j-examples/graph-embeddings/main/data/roads.csv>.

⁸ <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46990>.

3. Hamilton W. L., Rex Ying, Leskovec J. (2017) *Representation Learning on Graphs: Methods and Applications*. Stanford, Stanford University. (9), 1–25.
4. Portisch Jan, Heist Nicolas, Paulheim Heiko (2022) Knowledge Graph Embedding for Data Mining VS. Knowledge Graph Embedding for Link Prediction – Two Sides of the Same Coin? *Semantic Web*. (1), 1–24. DOI 10.3233/SW-212892.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Пилецкий И. И., к. ф.-м. н., доцент кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Батура М. П., д. т. н., профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией 8.1 «Новые обучающие технологии» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Волорова Н. А., к. т. н., доцент, заведующая кафедрой информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-01
E-mail: piletski@bsuir.by
Пилецкий Иван Иванович

Information about the authors

Piletski I. I., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Informatics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Batura M. P., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Research Laboratory 8.1 “New Learning Technologies” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Volarava N. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Informatics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-01
E-mail: piletski@bsuir.by
Piletski Ivan Ivanavich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-110-117>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.934.2 + 004.85

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОТБОРА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЧЕВЫХ ПАТОЛОГИЙ ПО ГОЛОСУ

Д. С. ЛИХАЧЁВ, М. И. ВАШКЕВИЧ, Н. А. ПЕТРОВСКИЙ, И. С. АЗАРОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Задача выявления голосовых патологий отличается малым объемом доступных данных для обучения, вследствие чего системы классификации, использующие малоразмерные данные, являются наиболее актуальными. Предлагается совместное использование методов LASSO (least absolute shrinkage and selection operator) и BSS (backward stepwise selection) в отборе наиболее значимых признаков для задач определения голосовых патологий, в частности бокового амиотрофического склероза. Используются признаки на основе мел-частотных кепстральных коэффициентов, традиционно применяемые в обработке речевых сигналов, и на основе дискретной оценки огибающей спектра авторегрессионного процесса. Вторые спектральные признаки извлекаются с помощью генеративного метода, предполагающего вычисление дискретного преобразования Фурье последовательности отчетов, сгенерированной с использованием авторегрессионной модели входного голосового сигнала. Последовательность генерируется таким образом, чтобы учесть периодическую природу преобразования Фурье. Это позволяет повысить точность оценки спектра и уменьшить эффект спектральной утечки. Отбор признаков с помощью методов LASSO и BSS позволил повысить эффективность классификации, используя меньшее число признаков, по сравнению с применением только метода LASSO.

Ключевые слова: анализ голоса, генеративный метод, авторегрессия, машинное обучение, спектральные признаки, классификация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Комбинированный метод отбора информативных признаков для выявления речевых патологий по голосу / Д. С. Лихачёв [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 110–117. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-110-117>.

COMBINED METHOD FOR INFORMATIVE FEATURE SELECTION FOR SPEECH PATHOLOGY DETECTION

DENIS S. LIKHACHOV, MAXIM V. VASHKEVICH, NICK A. PETROVSKY,
ELIAS S. AZAROV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15.05.2023

Abstract. The task of detecting vocal abnormalities is characterized by a small amount of available data for training, as a consequence of which classification systems that use low-dimensional data are the most relevant. We propose to use LASSO (least absolute shrinkage and selection operator) and BSS (backward stepwise selection) methods together to select the most significant features for the detection of vocal pathologies, in particular amyotrophic lateral sclerosis. Features based on fine-frequency cepstral coefficients, traditionally used in speech signal

processing, and features based on discrete estimation of the autoregressive spectrum envelope are used. Spectral features based on the autoregressive process envelope spectrum are extracted using the generative method, which involves calculating a discrete Fourier transform of the report sequence generated using the autoregressive model of the input voice signal. The sequence is generated by the autoregressive model so as to account for the periodic nature of the Fourier transform. This improves the accuracy of the spectrum estimation and reduces the spectral leakage effect. Using LASSO in conjunction with BSS allowed us to improve the classification efficiency using a smaller number of features as compared to using the LASSO method alone.

Keywords: voice analysis, generative method, autoregression, machine learning, spectral features, classification.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Likhachov D. S., Vashkevich M. V., Petrovsky N. A., Azarov E. S. (2023) Combined Method for Informative Feature Selection for Speech Pathology Detection. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 110–117. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-110-117> (in Russian).

Введение

Большое количество систем обработки речевых и голосовых сигналов с использованием машинного обучения оперируют признаками в частотной области [1–3]. Извлечение признаков в таких системах сводится к получению в том или ином виде оценки спектра входного сигнала. При этом основным требованием является как можно более высокое спектральное разрешение при удовлетворительной точности оценки для целевой задачи.

Задача выявления патологий по голосу – особенно сложная, поскольку объем обучающих данных недостаточен для использования широко применяемых сегодня методов машинного обучения. В качестве примера можно выделить задачу выявления по голосу бокового амиотрофического склероза (БАС). Малый объем доступных данных здесь обусловлен спецификой заболевания. БАС – нейродегенеративное неизлечимое заболевание, около 50 % пациентов с БАС умирают в течение 30 мес после появления симптомов [4]. На данный момент не обнаружено каких-либо биологических маркеров БАС, и диагноз ставится на основании совокупности клинических наблюдений. В среднем для постановки диагноза требуется более года [5]. Трудности с речью или глотанием (бульбарные симптомы) – первые симптомы примерно у 30 % людей с БАС [6]. Почти у всех пациентов с БАС слышимые врачом бульбарные симптомы проявляются на более поздних стадиях. Соответственно организовать массовый сбор речевого материала у пациентов с верифицированным диагнозом достаточно сложно.

В статье определяющая роль в решении задачи детектирования голосов пациентов с БАС отводится синтезу характеристического вектора признаков и отбору наиболее информативных из них. В большинстве случаев для вычисления признаков в частотной области используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [1], однако исходя из существующих ограничений признаки на основе ДПФ являются избыточными. Альтернативы – признаки на основе мел-кепстральных коэффициентов (МЧКК) и дискретной оценки огибающей спектра авторегрессионного процесса (ОСАП) [7].

В условиях ограниченной обучающей выборки важная задача – способ отбора малого числа информативных признаков, наиболее характерных для патологии. Исследована идея совместного использования двух методов отбора LASSO (least absolute shrinkage and selection operator) и BSS (backward stepwise selection). Приводятся результаты экспериментов, полученные при помощи классификатора, обученного на ограниченной речевой обучающей выборке и использующего малоразмерные признаки как на основе МЧКК, так и на основе ОСАП. Экспериментальная оценка позволяет сделать вывод о высокой эффективности полученного решения.

Малоразмерные признаки на основе оценки огибающей спектра авторегрессионного процесса

Мел-кепстральные коэффициенты широко применяются в обработке речевых сигналов [1, 2]. Оценка ОСАП признаков является авторским методом, который кратко изложен ниже. Признаки на основе ОСАП получаются в результате ДПФ сгенерированной последовательности малой длины. Процесс вычисления дискретной оценки ОСАП включает несколько этапов.

1. По входному кадру анализируемого сигнала с использованием автокорреляционного метода определяются параметры авторегрессионной (АР) модели P -го порядка: $a_k, k = \overline{1, P}$ [8].

2. С помощью АР-модели генерируется последовательность с периодом, равным размеру ДПФ. Размер ДПФ зависит от целевой размерности вектора признаков и покрываемого им частотного диапазона.

Пусть требуется сгенерировать ненулевую последовательность $x(m)$ длины M

$$\sum_{m=1}^M |x(m)| \neq 0. \quad (1)$$

Используя параметры АР-модели анализируемого процесса, получаем следующее соотношение [8]:

$$x(m) = -\sum_{k=1}^P a_k x(m-k), \quad m = \overline{1, M+P}. \quad (2)$$

Положив $x(m) = 0$ при $m = \overline{M+1, M+P}$ и $m = \overline{-P+1, 0}$, выражение (2) для $m = \overline{1, M}$ можно записать в виде равенства

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -a_1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -a_2 & a_1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -a_P \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(M) \end{pmatrix} = 0. \quad (3)$$

Для выполнения условия (1) установим $x(M/2) = 1$. Решив систему линейных уравнений (3), найдем искомую последовательность $x(m)$, $m = \overline{1, M}$, причем для нее будет характерно затухание к краям кадра, что позволяет добиться того же эффекта, как и в случае применения оконной функции.

3. Вычисляется ДПФ одного периода последовательности, сгенерированной на этапе 2:

$$S_{est}(k) = \left| \sum_{m=0}^{M-1} x(m) e^{-i \frac{2\pi}{M} km} \right|, \quad k = \overline{1, \frac{M}{2}}. \quad (4)$$

Полученный дискретный спектр $S_{est}(k)$ используется в качестве вектора признаков для анализа голосового сигнала.

На рис. 1 проиллюстрированы основные этапы вычисления малоразмерных спектральных признаков на основе ОСАП.

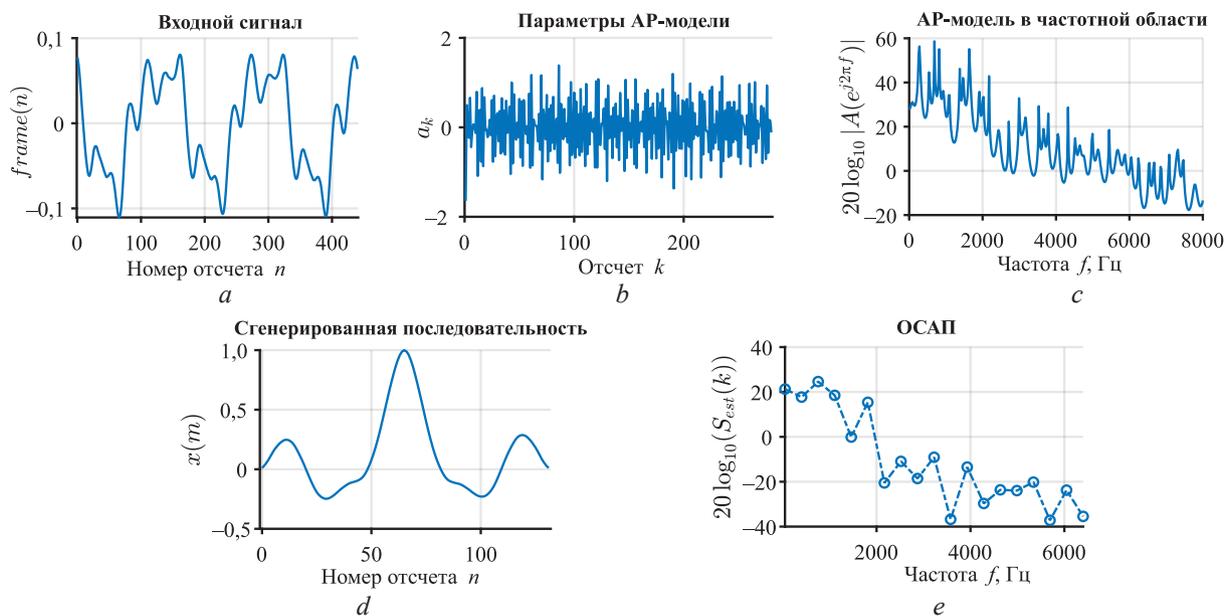


Рис. 1. Этапы получения оценки огибающей спектра авторегрессионного процесса
Fig. 1. Stages of obtaining an estimate of the envelope spectrum of the autoregressive process

На рис. 1, *a* показан один фрейм исходного сигнала, на рис. 1, *b* – вычисленные параметры АР-модели сигнала. В данном случае использовался порядок фильтра-предсказателя, равный 280. На рис. 1, *c* изображено частотное представление АР-модели сигнала, из которого видно, что модель достаточно точно описывает гармоническую структуру сигнала, на рис. 1, *d* – демонстрируется последовательность, получаемая в результате решения системы (3). Можно видеть, что центральный отсчет равен единице, а по краям интервала наблюдения сигнал стремится к нулю, что при спектральном оценивании дает тот же эффект, что и применение оконной функции. На рис. 1, *e* показано вычисление ДПФ от сгенерированной последовательности. Полученные спектральные составляющие называются ОСАП и используются в качестве вектора признаков для анализа голоса.

Система автоматического выявления патологии на основе машинного обучения с использованием малоразмерных спектральных признаков

Для экспериментальной оценки эффективности применения различных методов отбора наиболее информативных признаков использовали систему анализа и классификации голосового сигнала, описанную в [9] (рис. 2). В системе выполняется бинарная классификация (норма/патология) на основе анализа протяжного звука «а». Анализ заключается в сегментировании сигнала на кадры (продолжительность – от 10 до 40 мс), после чего выполнялся расчет кратковременных и надсегментных признаков [10]. Векторы надсегментных признаков передаются в классификатор, который работает на основе метода опорных векторов SVM (Support Vector Machine) [11].

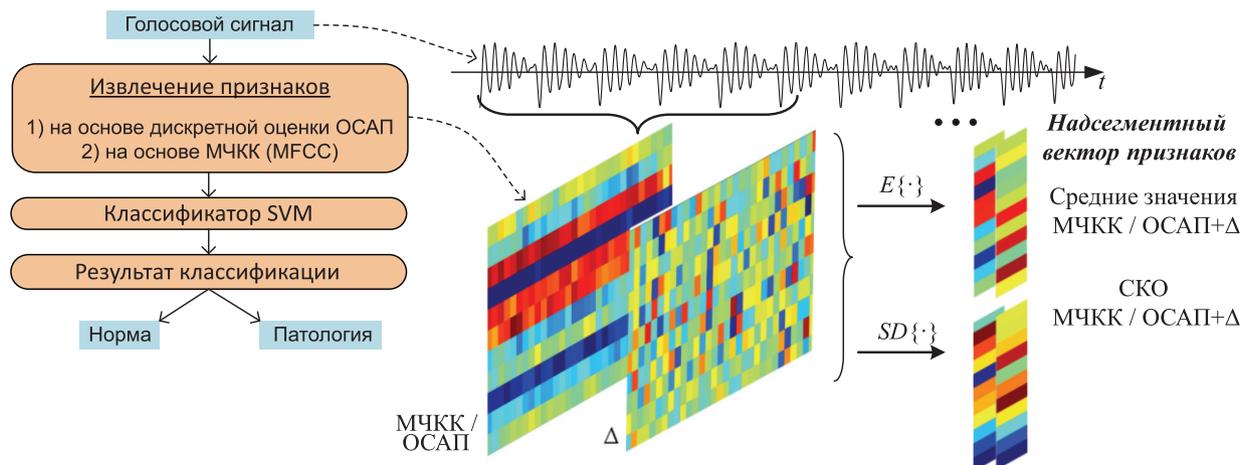


Рис. 2. Система анализа и классификации для выявления патологии
Fig. 2. Analysis and classification system for pathology detection

Надсегментные признаки [10] представляют собой средние значения и среднеквадратичное отклонение (СКО) кратковременных признаков (МЧКК и признаков на основе ОСАП) на продолжительном интервале наблюдения (до 1 с). Для расчета МЧКК использовался метод, описанный в [9]. Малоразмерные спектральные признаки на основе дискретной оценки ОСАП вычислялись в соответствии с (4).

На этапе проектирования классификатора с целью повышения эффективности его работы выполняли отбор признаков с совместным применением методов LASSO [12] и BSS [13]. Метод LASSO использует модель линейной регрессии со штрафной функцией, накладываемой на сумму абсолютных значений коэффициентов модели. Решение находится итеративно при изменении штрафных весов. Порядок обращения параметров модели в нуль определяется степенью влияния соответствующих признаков на качество классификации. BSS, в свою очередь, обеспечивает перебор признаков, исключая те из них, которые ухудшают решение.

Для обучения и тестирования системы использовалась база, содержащая 64 образца голосовых сигналов (протяжный звук «а») [14]. В базе имелись записи 33 здоровых пациентов (13 мужчин, 20 женщин) и 31 пациента, больных БАС (17 мужчин, 14 женщин).

Результаты исследований и их обсуждение

Используя систему автоматического выявления патологии на основе машинного обучения, выполнена оценка эффективности применения методов LASSO и BSS для отбора наиболее информативных признаков. При проведении экспериментов размерность вектора надсегментных признаков N варьировалась от 36 до 76 в зависимости от количества используемых параметров в частотной области M , т. е. $N = 4 \cdot (M - 1)$. В случае вычисления признаков на основе МЧКК значение M равно числу кепстральных коэффициентов, а в случае вычисления с помощью ОСАП – количеству отсчетов в частотной области в целевом диапазоне частот. Нижняя и верхняя границы частотного диапазона, используемого для формирования признаков, ограничивалась пределами 50–400 Гц. Длительность кадра анализа T составляла 10–40 мс. При вычислении ОСАП использовался порядок фильтра-предсказателя $P = 280$.

Для оценки производительности классификатора применяли метод перекрестной проверки LOSO [15], при котором классификатор тестируется итерационно. На каждой итерации в тестовый набор включаются данные, соответствующие одному диктору, а в обучающий набор – все оставшиеся. В качестве критерия эффективности классификации использовали среднюю сбалансированную точность классификации \overline{BA} , вычисляемую по следующей формуле:

$$\overline{BA} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I BA_i = \frac{1}{2I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{TP_i}{TP_i + FN_i} + \frac{TN_i}{TN_i + FP_i} \right), \quad (5)$$

где TP_i, TN_i, FP_i, FN_i – количество истинно положительных, истинно отрицательных, ложноположительных и ложноотрицательных результатов классификации для i -й итерации соответственно; I – количество итераций, соответствует количеству дикторов.

В табл. 1, 2 приведены полученные средние сбалансированные точности признаков классификации речи на основе МЧКК и ОСАП в зависимости от базового количества признаков N и длительности кадра анализа T для разных вариантов отбора признаков (без отбора, с LASSO, с LASSO + BSS). Жирным шрифтом выделены наилучшие достигнутые результаты.

Таблица 1. Средняя точность признаков классификации речи на основе мел-кепстральных коэффициентов

Table 1. Average accuracy of speech classification features based of mel-cepstral coefficients

T, мс / T, ms	Средняя точность \overline{BA} , % / Average accuracy \overline{BA} , %								
	Без отбора признаков / Without feature selection			LASSO			LASSO + BSS		
	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76
10	58,1	63,1	61,9	71,8	77,9	84,4	74,2	84,1	84,8
15	64,9	54,8	62,8	75,7	76,7	79,1	75,8	76,7	84,7
20	65,9	61,4	63,8	75,1	74,0	81,6	75,1	74,1	84,6
25	66,6	59,9	60,6	77,2	74,2	80,5	77,2	81,0	82,8
30	63,9	57,7	64,6	77,2	74,9	81,9	77,2	77,3	84,7
35	61,4	63,0	59,9	76,5	71,6	77,2	76,5	80,1	77,8
40	64,2	61,6	61,0	78,6	76,7	77,6	78,6	80,3	80,2

Таблица 2. Средняя точность признаков классификации речи на основе огибающей спектра авторегрессионного процесса

Table 2. Average accuracy of speech classification features based on the envelope spectrum of the autoregressive process

T, мс / T, ms	Средняя точность \overline{BA} , % / Average accuracy \overline{BA} , %								
	Без отбора признаков / Without feature selection			LASSO			LASSO + BSS		
	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76
10	60,3	68,4	70,5	75,8	85,5	83,2	75,8	88,6	83,2
15	67,3	74,3	75,4	76,1	81,4	81,1	79,7	87,7	87,6
20	61,9	71,3	74,8	75,4	83,6	83,3	75,9	89,0	90,3
25	67,2	66,8	74,5	72,5	79,1	83,4	75,5	85,6	89,8

Окончание табл. 2
Ending of Tab. 2

T, мс / T, ms	Средняя точность \overline{BA} , % / Average accuracy \overline{BA} , %								
	Без отбора признаков / Without feature selection			LASSO			LASSO + BSS		
	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76
30	61,1	69,1	75,1	68,5	81,3	87,2	73,1	87,5	90,1
35	58,5	71,0	72,4	66,5	77,8	84,3	69,4	85,9	89,0
40	62,2	70,6	73,9	72,3	81,4	85,2	72,5	84,2	90,1

В табл. 3, 4 показано, как менялось итоговое количество признаков классификации речи на основе МЧКК и ОСАП после выполнения процедуры отбора в зависимости от N и T с помощью методов LASSO и LASSO + BSS.

Таблица 3. Количество признаков классификации речи на основе мел-кепстральных коэффициентов
Table 3. Number of speech classification features based on mel-cepstral coefficients

T, мс / T, ms	Количество признаков, шт. / Number of features, pcs.					
	LASSO			LASSO + BSS		
	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76
10	6	24	21	3	16	20
15	6	4	27	5	4	19
20	4	5	13	4	4	9
25	5	27	18	5	21	16
30	5	21	16	5	17	11
35	5	40	5	5	31	4
40	5	16	10	5	14	6

Таблица 4. Количество признаков классификации речи на основе огибающей спектра авторегрессионного процесса
Table 4. Number of speech classification features based on the envelope spectrum of the autoregressive process

T, мс / T, ms	Количество признаков, шт. / Number of features, pcs.					
	LASSO			LASSO + BSS		
	N = 36	N = 56	N = 76	N = 36	N = 56	N = 76
10	6	23	4	6	16	4
15	17	28	43	13	19	37
20	11	35	34	10	27	27
25	17	28	56	11	20	41
30	16	31	35	11	21	31
35	17	35	33	15	27	29
40	13	26	31	12	20	21

Из табл. 1–4 видно, что наибольшая сбалансированная точность классификации достигается при использовании признаков на основе дискретной оценки ОСАП для фрейма анализа длительностью 20 мс. Совместное применение методов LASSO и BSS для отбора наиболее информативных признаков предпочтительнее использования одного метода LASSO, поскольку это позволяет не только уменьшить количество признаков, но и значительно повысить эффективность классификации.

Выводы

1. Предложено совместное использование методов LASSO и BSS при отборе информативных признаков для классификации речи с целью выявления голосовых патологий. Эксперименты с речевым материалом, включающим образцы здоровых дикторов и дикторов с патологией, позволяют заключить, что данный подход может быть применен для создания систем скрининг-диагностики на основе алгоритмов машинного обучения в условиях крайне ограниченной обучающей выборки.

2. Система классификации, примененная в экспериментах, показала высокую эффективность при использовании малого речевого корпуса, содержащего всего 54 диктора. Применение BSS совместно с LASSO в целом заметно повысило эффективность классификатора, позволяя на меньшем числе признаков получить более высокую точность классификации [7].

Список литературы

1. Rabiner, L. R. *Fundamentals of Speech Recognition* / L. R. Rabiner, B. H. Juang // Pearson Education. 1993.
2. Benba, A. Discriminating between Patients with Parkinson's and Neurological Diseases Using Cepstral Analysis / A. Benba, A. Jilbab, A. Hammouch // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2016. Vol. 24, No 10. P. 1100–1108.
3. Vashkevich, M. Classification of ALS Patients Based on Acoustic Analysis of Sustained Vowel Phonations / M. Vashkevich, Y. Rushkevich // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2021. Vol. 65. P. 1–14.
4. Amyotrophic Lateral Sclerosis / M. C. Kiernan [et al.] // *Lancet*. 2011. Vol. 377, Iss. 9769. P. 942–955.
5. Detection of Bulbar ALS Using a Comprehensive Speech Assessment Battery / Y. Yunusova [et al.] // *Proceedings of the International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*. 2013. P. 217–220
6. Fractal Features for Automatic Detection of Dysarthria / T. Spangler [et al.] // *IEEE EMBS International Conference on Biomedical Health Informatics*. 2017. P. 437–440.
7. Малоразмерные спектральные признаки для машинного обучения в задачах анализа и классификации голосового сигнала / Д. С. Лихачёв [и др.] // *Информатика*. 2023. № 1. С. 102–112. DOI: 10.37661/1816-0301-2023-20-1-102-112.
8. Markel, J. D. *Linear Prediction of Speech* / J. D. Markel, A. H. Gray. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1976. 290 p.
9. Вашкевич, М. И. Система анализа и классификации голосового сигнала на основе пертурбационных параметров и кепстрального представления в психоакустических шкалах / М. И. Вашкевич, Д. С. Лихачёв, И. С. Азаров // *Доклады БГУИР*. 2022. Т. 20, № 4. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-73-82>.
10. Анализ акустических параметров голоса для выявления заболеваний гортани / М. И. Вашкевич [и др.] // *Информатика*. 2020. № 17. С. 78–86.
11. Flach, P. *Machine Learning: the Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data* / P. Flach. Great Britain: Cambridge University Press, 2012. 416 p.
12. *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R* / G. James [et al.]. Springer, 2013. 440 p.
13. Kotu, V. *Data Science: Concepts and Practice* / V. Kotu, B. Deshpande. 2 ed. USA: Morgan Kaufmann Publishers an Imprint of Elsevier, 2019.
14. Voice Database Used in the Article Classification of ALS Patients Based on Acoustic Analysis of Sustained Vowel Phonations [Electronic Resource]. Mode of access: https://github.com/Mak-Sim/Minsk2020_ALS_database. Date of access: 12.05.2023.
15. The Necessity of Leave One Subject Out (LOSO) Cross Validation for EEG Disease Diagnosis / S. Kunjan [et al.] // *Brain Informatics*. Springer, 2021. P. 558–567.

References

1. Rabiner L. R., Juang B. H. (1993) *Fundamentals of Speech Recognition*. Pearson Education.
2. Benba A., Jilbab A., Hammouch A. (2016) Discriminating between Patients with Parkinson's and Neurological Diseases Using Cepstral Analysis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 24 (10), 1100–1108.
3. Vashkevich M., Rushkevich Y. (2021) Classification of ALS Patients Based on Acoustic Analysis of Sustained Vowel Phonations. *Biomedical Signal Processing and Control*. 65, 1–14.
4. Kiernan M. C. (2011) Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Lancet*. 377 (9769), 942–955.
5. Yunusova Y. (2013) Detection of Bulbar ALS Using a Comprehensive Speech Assessment Battery. *Proceedings of the International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*. 217–220.
6. Spangler T. (2017) Fractal Features for Automatic Detection of Dysarthria. *IEEE EMBS International Conference on Biomedical Health Informatics*. 437–440.
7. Likhachov D. S., Vashkevich M. I., Petrovsky N. A., Azarov E. S. (2023) Small-Size Spectral Features for Machine Learning in Voice Signal Analysis and Classification Tasks. *Informatics*. (20), 102–112. DOI: 10.37661/1816-0301-2023-20-1-102-112 (in Russian).
8. Markel J. D., Gray A. H. (1976) *Linear Prediction of Speech*. Berlin, New York, Springer-Verlag. 290.
9. Vashkevich M. I., Likhachov D. S., Azarov E. S. (2022) Voice Analysis and Classification System Based on Perturbation Parameters and Cepstral Presentation in Psychoacoustic Scales. *Doklady BGUIR*. 20 (1), 73–82. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-1-73-82 (in Russian).
10. Vashkevich M. I., Burak A. A., Kanoika N. S., Daldova V. S. (2020) Analysis of Acoustic Voice Parameters for Larynx Pathology Detection. *Informatics*. 17 (1), 78–86 (in Russian).
11. Flach P. (2012) *Machine Learning: the Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. Great Britain, Cambridge University Press Publ. 416.
12. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. (2013) *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. Springer Publ. 440.

13. Kotu V., Deshpande B. (2019) *Data Science: Concepts and Practice*. 2 ed. USA, Morgan Kaufmann Publishers an Imprint of Elsevier.
14. *Voice Database Used in the Article Classification of ALS Patients Based on Acoustic Analysis of Sustained Vowel Phonations*. Available: https://github.com/Mak-Sim/Minsk2020_ALS_database (Accessed 12 May 2023).
15. Kunjan S., Grummett T. S., Pope K. J., Powers D. M. W., Fitzgibbon S. P., Lewis T. W. (2021) The Necessity of Leave One Subject Out (LOSO) Cross Validation for EEG Disease Diagnosis. *Brain Informatics*. Springer Publ. 558–567.

Вклад авторов

Лихачёв Д. С. проработал идею совместного использования методов LASSO и BSS, провел исследование ее целесообразности.

Вашкевич М. И., Петровский Н. А. приняли участие в программной реализации системы, предназначенной для постановки экспериментов. Вашкевич М. И. принимал участие в подготовке текста статьи и графического материала.

Азаров И. С. определил цели и задачи исследования. Все авторы принимали участие в подготовке текста статьи, анализе и интерпретации результатов экспериментов.

Authors' contribution

Likhachov D. S. worked out the idea of joint use of LASSO and BSS methods, conducted a study of its feasibility.

Vashkevich M. I. and Petrovsky N. A. took part in the software implementation of the system intended for setting up experiments.

Azarov E. S. determined the goals and objectives of the study. All authors took part in the preparation of the text of the article, analysis and interpretation of the experimental results.

Сведения об авторах

Лихачёв Д. С., к. т. н., доцент, доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Вашкевич М. И., д. т. н., доцент, доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Петровский Н. А., к. т. н., доцент, доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Азаров И. С., д. т. н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-05
E-mail: likhachov@bsuir.by
Лихачёв Денис Сергеевич

Information about the authors

Likhachov D. S., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Computer Engineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vashkevich M. I., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor at Computer Engineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Petrovsky N. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Computer Engineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Azarov E. S., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Computer Engineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-05
E-mail: likhachov@bsuir.by
Likhachov Denis Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.942, 51-7, 615.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОТАРГЕТИНГА ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ, ОСНОВАННОЕ НА ВЫЧИСЛЕНИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТКАНИ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

А. В. ЧУРАКОВ¹, П. В. КАМЛАЧ¹, А. И. ОНГАРБАЕВА²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева (г. Астана, Республика Казахстан)

Поступила в редакцию 05.04.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Анализ исследований в области таргетной доставки препаратов, генов и стволовых клеток показал низкий уровень точности прикладных и практических исследований в данной области. В настоящее время применяется экстракорпоральное электромагнитное воздействие на фармакологический комплекс с наночастицей ферромагнетика. Однако при таком подходе достаточно сложно реализовать алгоритм введения препарата в топографическую область (орган-мишень), поскольку на практике клиническое применение технологии транспорта лекарственных средств с учетом физико-химических свойств тканей организма человека детально не изучено. Существующие модели представляют различные физико-математические подходы, которые не учитывают биоэлектрические и электростатические свойства тканей изучаемых организмов животных и человека. Разработка алгоритмов и программного моделирования данной технологии позволит рассчитать переменные частоты для магнитотаргетинга в цифровом фантоме человека. Это уменьшит временные затраты на стадии пилотных и клинических испытаний. В статье приведены методология и результаты мультифизического и математического моделирования в пакете Sim4Life for Science, V7.0 на примере вычислений управляющих параметров электромагнитного поля региона в области обычного введения препаратов – в сосуды предплечья.

Ключевые слова: коэффициент удельного поглощения, проницаемость тканей, полноволновые решатели электромагнетизма, моделирование, электромагнитное поле, фантом Youn-sun cV4.0.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность ZMT Zurich MedTech AG за предоставление программного обеспечения Sim4Life.

Для цитирования. Чураков, А. В. Моделирование магнитотаргетинга лекарственных средств, основанное на вычислении проницаемости электромагнитного поля в ткани организма человека / А. В. Чураков, П. В. Камлач, А. И. Онгарбаева // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 118–123. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123>.

SIMULATION OF MAGNETOTARGETING OF MEDICINES BASED ON THE CALCULATION OF PERMEABILITY OF HUMAN TISSUES BY THE ELECTROMAGNETIC FIELD

ANDREJ V. CHURAKOV¹, PAVEL V. KAMLACH¹, AINAGUL I. ONGARBAYEVA²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²L. N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Republic of Kazakhstan)

Submitted 05.04.2023

Abstract. Analysis of studies in the field of targeted delivery of drugs, genes and stem cells showed a low level of accuracy of both applied and practical research in this area. Sufficiently encouraging results were obtained with extracorporeal electromagnetic action on a pharmacological complex with a ferromagnetic nanoparticle. With this approach, it is rather difficult to implement the algorithm for introducing the drug into the topographic region (target organ), since in practice, approaches to the clinical application of drug transport technology, taking into account the physicochemical properties of human body tissues, have not been studied in detail. The available models represent various physical and mathematical approaches that do not take into account the bioelectrical and electrostatic properties of the tissues of the organisms of experimental animals and humans. The creation of algorithms and software simulation of this technology will allow calculating variable frequency variables for magnetotargeting in a human digital phantom, which will reduce time spent at the stage of pilot and clinical trials and in the future will form the applied part of the innovative technology. The article presents the methodology and results of multiphysics and mathematical modeling in the Sim4Life for Science, V7.0 package on the example of calculating the control parameters of the electromagnetic field of the region in the area of normal administration of drugs – the vessels of the forearm.

Keywords: index of local specific absorption coefficient, tissue permeability, full wave electromagnetism solvers, modeling, electromagnetic field, Yoon-sun cV4.0 phantom.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors express their gratitude to ZMT Zurich MedTech AG for providing the Sim4Life software.

For citation. Churakov A. V., Kamlach P. V., Ongarbayeva A. I. (2023) Simulation of Magnetotargeting of Medicines Based on the Calculation of Permeability of Human Tissues by the Electromagnetic Field. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 118–123. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123> (in Russian).

Введение

В процессе исследований выполнено моделирование технологии управляемого транспорта фармакологических комплексов с наночастицей ферромагнетика при экстракорпоральном электромагнитном воздействии в цифровом фантоме человека Yoon-sun cV4.0 с заданными биоэлектрическими и электростатическими свойствами тканей и органов. Создание программной модели магнитотаргетинга в организме человека позволит определить диапазоны экстракорпорального воздействия электромагнитного поля на фармакологические комплексы для доставки из топографического региона введения в орган-мишень. На примере моделирования проницаемости электромагнитного поля топографической области введения лекарственных средств по сосудам верхней конечности показан алгоритм с соответствующими расчетами. Разработанные алгоритмы, смоделированные технологии и полученные результаты являются максимально приближенными для управления транспортом фармакологических комплексов в организме человека и основополагающими при клинических испытаниях [1–3].

Моделирование воздействия электромагнитного поля на биологические ткани

Sim4Life for Science – инновационная платформа для моделирования, обладающая физическими решателями для непосредственного анализа биофизических явлений организма человека и компонентов медицинского оборудования в проверенных биологической и анатомической средах, в том числе для моделирования воздействия электромагнитного поля на биологические ткани, органокомплексы и в целом на организм человека и подопытных животных [4]. В зависимости от применяемых настроек моделирования с помощью датчика можно получить показатели пространственного распределения воздействия, а также время и частоту сигнала [5, 6].

В процессе исследования проведено двухэтапное моделирование. Предварительно на цифровом фантоме человека определили необходимую частоту сигнала, который сможет воздейство-

вать на капсулу с лекарственным комплексом. Для выполнения моделирования спроектировали прямоугольные параллелепипеды с целью последовательной имитации различных биологических материалов (воздуха, кожи, жировой ткани, мышц и костной ткани) и одноэлементный фокусирующий индуктор, представленные на рис. 1.

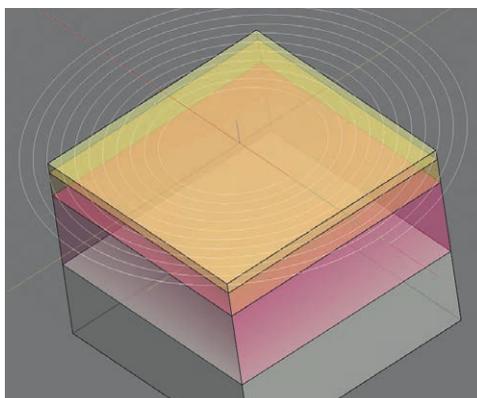


Рис. 1. Внешний вид построенной в Sim4Life for Science модели
Fig. 1. Visual application of the constructed model in Sim4Life for Science

Геометрические размеры спроектированной модели задавались исходя из средних значений параметров анатомических тканей тела человека:

- общие размеры параллелепипеда $160 \times 160 \times 107$ мм;
- толщина слоя кожи 2 мм;
- толщина слоя жировой ткани 5 мм;
- толщина слоя мышц 50 мм;
- толщина слоя кости 50 мм;
- размеры излучателя (крайние точки) $84,3 \times 84,3 \times 15,4$ мм;
- расстояние от излучателя до точки фокуса 49 мм.

Рассматривали участок сосудов предплечья левой руки. Частота воздействующего сигнала составляла 4 кГц, ток в катушке индуктора – 1 А. На рис. 2 изображены диаграммы распространения электромагнитного поля на поверхности верхних слоев тканей для квазистатического воздействия.

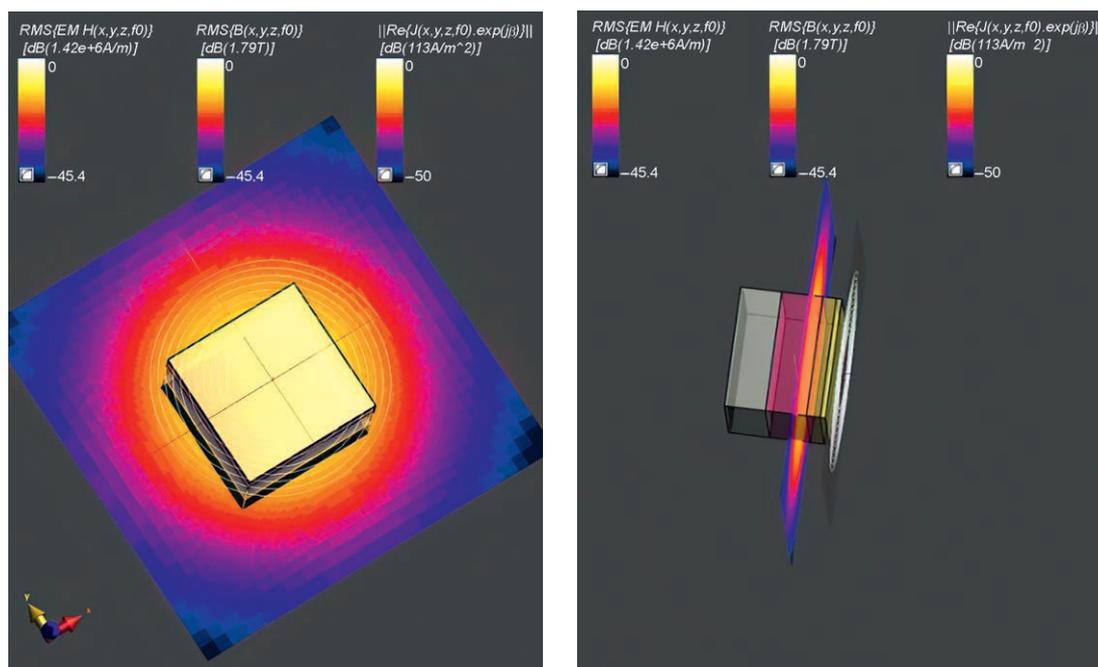


Рис. 2. Диаграммы распространения электромагнитного поля на поверхности верхних слоев тканей
Fig. 2. Diagrams of the propagation of an electromagnetic field on the surface of the upper layers of tissues

В процессе исследований с помощью решателя Quasi-Static FDTD получено среднее значение удельного коэффициента поглощения электромагнитного излучения (specific absorption rate, SAR) 2,43 Вт/кг по четырем типам тканей (мышцы, кожа, кость, подкожная жировая ткань) при воздействии электромагнитным излучением с частотой 4 кГц. По мере роста частоты электромагнитного излучения поглощение энергии телом характеризуется большей интенсивностью, а глубина воздействия излучения на кожу зависит от длины волны электромагнитных колебаний. При 300 МГц глубина проникновения электромагнитного поля обычно составляет 50 мм, а при 6 ГГц – примерно 5 мм.

Используемая частота электромагнитного излучения очень низкая – 4 кГц, что позволяет излучению проникать на большую глубину и осуществлять воздействие на капсулу с лекарственным комплексом. Кроме того, такое значение частоты безопасно для пациента и медперсонала.

Моделирование в цифровом фантоме человека Yoon-sun cV4.0

Результаты моделирования SAR показали, что частота воздействующего электромагнитного сигнала, равная 4 кГц, наиболее оптимальна для управления с помощью электромагнитного поля капсулой с лекарственным комплексом в кровяном русле. Моделирование проводили в цифровом фантоме человека Yoon-sun cV4.0. Поскольку в процессе исследований ставилась задача получить приближенные, а не точные значения с помощью статического индуктора, симуляцию выполняли посредством решателя Quasi-Static FDTD. Для получения вокселя (элемента объемного изображения), в котором должно было осуществляться воздействие электромагнитным полем, построили сетку размерами 200×200 мм. На рис. 3 изображен срез участка артерии, находящегося под воздействием электромагнитного излучения.

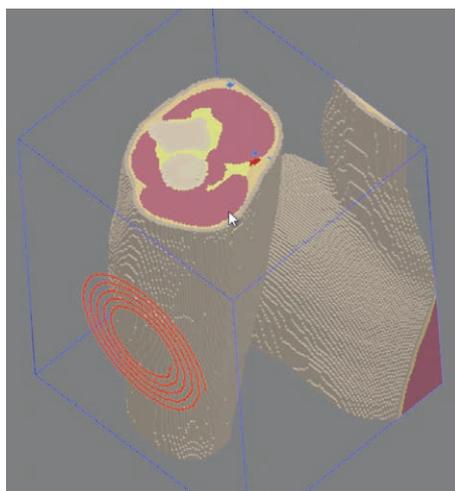


Рис. 3. Изображение вокселя, в котором осуществлялось воздействие электромагнитным полем на капсулу в артерии с учетом всех тканей

Fig. 3. Image of a voxel in which an electromagnetic field was applied per capsule in the artery, taking into account all tissues

Результаты Quasi-Static FDTD по четырем типам биологических тканей, полученные при моделировании в цифровом фантоме человека Yoon-sun cV4.0, приведены в табл. 1.

Таблица 1. SAR-параметры, рассчитанные на фантоме Yoon-sun cV4.0
Table 1. SAR parameters calculated on the phantom Yoon-sun cV4.0

Тип биологической ткани / Type of biological tissue	Потеря максимальной плотности мощности, Вт/м ³ / Loss of maximum power density, W/m ³	Уровень SAR, Вт/кг / SAR level, W/kg		
		Минимальный / Minimum	Усредненный по массе / Weight-averaged	Максимальный / Maximum
Мышцы	$3,82e^4$	$1,02e^2$	10,1	35
Кожа	56,7	$4,3e^3$	$2,2e^{-2}$	$5,11e^{-2}$
Кость	458,5	$5,93e^5$	$4e^{-2}$	0,24
Подкожная жировая ткань	$9,928e^3$	$7,47e^3$	3,5	10,9

По результатам моделирования можно отметить, что наибольшее значение SAR – в мышечной, а наименьшее – в костной ткани. Нет прямой зависимости удельного коэффициента поглощения электромагнитного излучения от частоты, потому что наибольшее его значение наблюдается на поверхности, обращенной к полю падающего электромагнитного излучения. Величина SAR зависит от положения индуктора и диэлектрических свойств тканей организма человека. Последние имеют разные значения диэлектрических свойств (проницаемость и проводимость), которые к тому же являются частотно зависимыми и неоднородными в пространстве, а также обладают собственным электромагнитным полем. Поэтому проводимость и диэлектрическая проницаемость тканей человеческого тела влияют на количество поглощенного излучения.

Если сравнить полученные на фантоме значения удельного коэффициента поглощения электромагнитного излучения со значениями, полученными в ходе эксперимента на упрощенной модели участка тканей при электромагнитном воздействии, можно отметить, что они отличаются, но общие зависимости сохраняются. Эти отличия связаны с довольно точной передачей электрических и физиологических параметров реального человека на фантоме и с достаточно усредненными параметрами проницаемости участков тканей, которые задавались в их упрощенной модели. Установлено, что частоты электромагнитного излучения 4 кГц будет достаточно для воздействия на капсулу с лекарством внутри кровяного русла для дальнейшей доставки к пораженным органам.

Заключение

1. Для точного расчета управления электромагнитным полем лекарственными средствами с наночастицей ферромагнетика необходимо производить вычисления по пути следования орган-мишень. При разработке и моделировании индукторов для магнитотаргетинга следует задавать свойства материалов излучателя.

2. Определение локального удельного коэффициента поглощения электромагнитного излучения – важный параметр для реализации магнитотаргетинга на практике. Поскольку вычисления необходимы для контроля транспорта наночастиц с ферромагнетиком в составе капсул, моделирование и расчеты для магнитотаргетинга следует проводить в нескольких точках транспорта лекарственных средств в проекции сосудов с помощью решателя Quasi-Static FDTD.

3. Полученные результаты можно применять в пилотных и клинических исследованиях. Платформа Sim4Life for Science V7.0 позволяет моделировать различные типы источников, элементы приборов электромагнитного излучения и реализовывать возможности их применения на цифровых фантомах подопытных животных и людей с современной и обновляемой базой данных всех электростатических и биоэлектрических характеристик тканей.

Список литературы

1. Модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани / П. В. Камлач [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 8. С. 46–52.
2. Чураков, А. В. Принципы моделирования и проектирования приборов магнито- и ультразвуковой терапии / А. В. Чураков. Минск: Белор. госуд. ун-т информ. и радиоэлек., 2019. 146 с.
3. Электромагнитотерапия: новые данные и технологии / В. С. Улащик [и др.]. Минск: Белар. навука, 2018.
4. Sim4Life Light Reference Guide Release 7.0. Switzerland: Zurich MedTech, 2023.
5. Cadwell, J. Principles of Magnetolectric Stimulation in Clinical Neurophysiology / J. Cadwell, S. Chokroverty. Boston, 1990.
6. Taflove, A. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove, S. C. Hagness, 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2005.

References

1. Kamlach P. V., Grodo D. S., Churakov A. V., Kamlach V. I., Bondarik V. M., Madveiko S. I., Klyuev A. P. (2020) Model of Electromagnetic Field Impact on Biological Tissues. *Doklady BSUIR*. 18 (8), 46–52 (in Russian).
2. Churakov A. V. (2019) *Principles of Modeling and Designing Devices for Magnetic and Ultrasonic Therapy*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 146 (in Russian).

3. Ulashchik V. S., Molchanova A. Y., Lark I. P., Melik-Kasumov T. B., Schastnaya N. I., Voichenko N. V., Morozova I. L., Nikiforenkov L. A., Kisten O. V. (2018) *Electromagnetic Therapy: New Data and Technologies*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. (in Russian).
4. *Sim4Life Light Reference Guide Release 7.0*. (2023) Switzerland, Zurich MedTech.
5. Cadwell J., Chokroverty S. (1990) *Principles of Magnetolectric Stimulation in Clinical Neurophysiology*. Boston.
6. Taflove A., Hagness S. C. (2005) *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*. Norwood, MA, Artech House.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Чураков А. В., к. м. н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Камлач П. В., к. т. н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Онгарбаева А. И., ст. преподаватель кафедры информационной безопасности Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-14
E-mail: kamlachpv@bsuir.by
Камлач Павел Викторович

Information about the authors

Churakov A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

Kamlach P. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

Ongarbayeva A. I., Senior Lecturer at the Department of Information Security of the L. N. Gumilyov Eurasian National University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-14
E-mail: kamlachpv@bsuir.by
Kamlach Pavel Viktorovich

