
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

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

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

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),

А.Н. Осипов (зам. главного редактора),

Т.В. Борботько (ответственный секретарь),

М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,

В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,

В.В. Муравьев, Писецкий Ю.В., Сигов А.С., М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,

И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,

В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,

В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев,

В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко,

В.А. Пилипенко, С.Л. Прищеп, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль

В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Фаняев И.А. Направленные ответвители СВЧ-диапазона на полосковых линиях с сильной боковой связью.....	5
Санько Н.С., Вашкевич М.И. Исследование применимости ДПФ-модулированного банка фильтров в системах со значительным усилением спектральных составляющих	14
Богуш Н.В., Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Дежкунов Н.В. Состав, структура и функциональные свойства композиционных электрохимических покрытий серебряно-вольфрама, сформированных при воздействии ультразвука.....	23

Буслюк В.В., Емельянов В.А., Баранов В.В., Дереченник С.С., Просолович В.С. Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов – генераторов шума	32
Мордачев В.И. Характеристики электромагнитной обстановки, создаваемой излучениями абонентского оборудования сотовой (мобильной) связи ...4G/5G/6G в зданиях	42
Серебряная Л.В., Ласый И.Е. Автоматическое распознавание и представление текста в виде аудиопотока	51
Соловьёв Я.А. Моделирование прямой ветви вольт-амперных характеристик диодов Шоттки с МОП-канавками.....	59
Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Барахоев А.Л., Тихон О.И., Моисеев А.А. Исследовательский стенд для микроплазменной поверхностной обработки материалов в условиях атмосферного давления	66
Волчѣк В.С., Стемпицкий В.Р. Нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, заполненной материалом с высокой теплопроводностью	74
Цветков В.Ю. Параллельное выращивание областей полутоновых изображений на основе выборочного среднего значения яркости области по маршруту роста.....	83

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Козлов С.В. Оценка производительности алгоритмов синтеза радиолокационных изображений с использованием технологии Cuda.....	92
Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т. Основные принципы построения высококачественных аналитических приспособляющихся систем управления теплоэнергетическими процессами	97

Корректura и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ, Т.В. МИРОНЕНКО

Подписано в печать 23.09.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,7. Тираж 100 экз. Заказ 171.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2021

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been 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 included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Editor-In-Chief

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, rm. 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Fanyaev I.A. Directional microwave coupled-line couplers with high lateral coupling level.	5
Sanko N.S., Vashkevich M.I. Research of application of DFT-modulated filter bank in systems with significant spectral component amplification	14
Bogush N.V., Khmyl A.A., Kushner L.K., Dezhkunov N.V. Composition, structure and functional properties of silver-tungsten composition electrochemistry coatings formed with the help of ultrasound.....	23
Busliuk V.V., Emelyanov V.A, Baranov V.V., Derehennik S.S., Prasalovich U.S. Stabilization of noise parameters during annealing of highly alloyed structures of noise diodes	32
Mordachev V.I. Characteristics of the electromagnetic environment created by radiations of user equipment of ...4G/5G/6G cellular (mobile) communications in buildings.....	42
Serebryanaya L.V., Lasy I.E. Automatic recognition and representation of text in the form of audio stream.....	51
Solovjov J.A. Simulation of forward current-voltage characteristics for Schottky diodes with MOS trenches	59
Bordusau S.V., Madveika S.I., Barakhoyeu A.L., Tsikhan O.I., Maiseyeu A.A. Research stand for microplasma surface treatment of materials at atmospheric pressure.....	66
Volcheck V.S., Stempitsky V.R. Gallium nitride heterostructure field-effect transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material	74

Tsviatkou V.Yu. Parallel region growing of half-tone images based on selected average brightness of the area along the growth route	83
--	----

SHORT NOTES

Kozlov S.V. Evaluation of the performance of algorithms for synthesizing radar images using Cuda technology	92
--	----

Kulakou G.T., Kulakou A.T. Basic principles of construction of high-quality analytical adaptable control systems for thermal energy processes	97
--	----



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.677

НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ С СИЛЬНОЙ БОКОВОЙ СВЯЗЬЮ

И.А. ФАНЯЕВ

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

Поступила в редакцию 15 декабря 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Классические направленные ответвители СВЧ-диапазона на связанных линиях с высоким уровнем боковой электромагнитной связи по типу направленности являются противонаправленными. Ограничения на их синтез накладывают зазор между линиями передачи, который должен быть крайне мал (десятки мкм), разность фазовых скоростей четных и нечетных мод, которую необходимо компенсировать и др. Из-за этого возникают сложности изготовления ответвителей. Описанные в технической литературе ответвители на связанных линиях с высоким уровнем связи с другими типами направленности либо достаточно громоздкие, либо при их изготовлении возникают конструкторско-технологические проблемы из-за малых размеров индуктивностей и емкостей, необходимых для использования в конструкциях ответвителей. Выполнен синтез противонаправленного ответвителя СВЧ-диапазона на полосковых линиях с сильной боковой связью. Ответвитель позволяет передавать входную мощность в один порт вспомогательного канала с полной связью (0 дБ, кроссовер). В топологии ответвителя используются периодические шлейфы, которые находятся между связанными линиями. Был произведен расчет и анализ эквивалентных схем связанных полосковых линий для одного периода шлейфов. Это позволило определить необходимые параметры и размеры топологии. Устройство является узкополосным ($3 \text{ ГГц} \pm 5\%$), коэффициент передачи минус 0,44 дБ на центральной частоте 3 ГГц, развязка с изолированными портами составляет не менее 35 дБ. Предложенный компактный ответвитель с уровнем связи 0 дБ может быть использован в распределительных схемах, в которых нужно исключить пересечения линий передач. Приводятся сведения о синтезе 3-х дБ сонаправленного ответвителя СВЧ-диапазона на связанных полосковых линиях с боковой электромагнитной связью. Ответвитель характеризуется высоким уровнем развязки с изолированным портом, не менее 40 дБ. Разбаланс амплитуд между рабочими (проходным и связанным) и входным портом составляет минус $(3,4 \pm 0,8)$ дБ.

Ключевые слова: направленный ответвитель, связанная линия, четная и нечетная мода, шлейф, параметры матрицы рассеяния, топология.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Фаняев И.А. Направленные ответвители СВЧ-диапазона на полосковых линиях с сильной боковой связью. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 5-13.

DIRECTIONAL MICROWAVE COUPLED-LINE COUPLERS WITH HIGH LATERAL COUPLING LEVEL

IVAN A. FANYAEV

Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Belarus)

Submitted 15 December 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Classic coupled-line couplers with a high lateral coupling level by type of directivity are counter-directional. Restrictions on their synthesis are imposed by the gap between transmission lines, which must be extremely small (tens of microns), the difference in the phase velocities of even and odd modes, which must be compensated and others. This makes it difficult of manufacturing couplers. Described in technical literature coupled-line couplers with a high lateral coupling level with changed types of directivity are either quite bulky or have small dimensions due to the use of discrete inductors and capacitances, which complicates the technological process with surface mounting when implementing the final device. In this article we propose a compact coupled-line coupler with a high lateral coupling level, which implements power transfer to a single port (0 dB, crossover). The coupler topology uses periodic loops that are located between coupled-line. The equivalent circuit of the coupled lines was calculated and analyzed for a single periodic stub. This allowed us to determine the necessary parameters and dimensions of the topology. The device is narrow-band ($3 \text{ GHz} \pm 5 \%$), transmission coefficient minus 0.44 dB at the center frequency of 3 GHz, isolation for isolated ports is not less than 35 dB. The proposed compact coupler with a coupling level of 0 dB suits building distribution circuits in which it is necessary to exclude the intersection of transmission lines. The information on the synthesis of the 3 dB co-directional microwave coupler on coupled strip lines with lateral electromagnetic coupling is given. The coupler is characterized by a high isolation level with an isolated port, not less than 40 dB. The imbalance of the amplitudes between the working (through and connected) and the input port is minus (3.4 ± 0.8) dB.

Keywords: directional coupler, coupled-line, odd and even mode, stub, scattering matrix parameters, topology.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Fanyaev I.A. Directional microwave coupled-line couplers with high lateral coupling level. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 5-13.

Введение

При разработке СВЧ-техники направленные ответвители (НО) представляют собой важный класс пассивных устройств. Самыми распространенными считаются квадратурные 3-х дБ НО, которые характеризуются равным делением входной мощности и сдвигом фаз волн в рабочих портах, составляющим 90 град.

Направленный ответвитель на связанных линиях представляет собой систему из двух линий передач, связанных между собой электромагнитным полем (рис. 1). Находят применение ответвители с боковой и лицевой электромагнитной связью. Отличительной особенностью ответвителей на связанных линиях от шлейфных ответвителей является их направленность. В зависимости от направления передачи энергии электромагнитной волны во вспомогательную линию различают следующие виды направленных ответвителей на связанных линиях: сонаправленные, транснаправленные и противонаправленные [1]. Направленные ответвители на связанных линиях являются противонаправленными. Применение на практике НО на связанных линиях с высоким уровнем боковой связи ограничено следующими основными причинами: необходимостью иметь малый зазор между линиями передачи (десятки мкм) [2], неудобством тандемного включения ответвителей при построении распределительных схем (из-за противонаправленности ответвителей).

Противонаправленный ответвитель рассмотрен в [3]. Сонаправленный 3-х дБ ответвитель уменьшенного размера, нагруженный периодически шунтирующими емкостными шлейфами,

описан в [4]. Для него длина связанной линии ответвителя составляет $0,75\lambda$, где λ – длина электромагнитной волны. Другие примеры сонаправленных НО на связанных линиях были представлены в [5, 6], они имеют низкий уровень связи. В статьях [7, 8] рассмотрены транснаправленные ответвители с малыми линейными размерами. Все указанные выше НО с различной направленностью имеют свои недостатки. Они либо являются устройствами больших размеров, либо для дискретных индуктивностей и емкостей, используемых в конструкциях ответвителей, в условиях производства сложно обеспечить малое отклонение их размеров от номинальных значений, что создает технологические проблемы при изготовлении ответвителей. Известно, если фазовые скорости четных и нечетных мод симметричных связанных линий различны, энергия может передаваться от одной линии к другой в прямом направлении [9]. Связь обратной волны может быть уменьшена до пренебрежимо малых значений, выбрав относительно большое расстояние между линиями. С другой стороны, значительная мощность может быть достигнута при передаче в прямом направлении, если длину связанной линии l подобрать в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10].

В статье приводятся научные результаты по синтезу противонаправленного ответвителя на полосковых связанных линиях с высоким уровнем боковой связи. Ответвитель позволяет передавать практически всю входную мощность в один порт вспомогательного канала, поэтому его называют кроссовером. Принцип синтеза ответвителя основан на увеличении разности между фазовыми скоростями четной и нечетной мод и уменьшении длины связанных линий, для чего используются периодические шлейфы, которые находятся между связанными линиями. В статье также приводятся сведения о сонаправленном 3-х дБ ответвителе на связанных полосковых линиях, синтез которого базируется на этом же принципе.

Теоретический анализ и расчет направленного ответвителя на связанных линиях

Параметры матрицы рассеяния S идеального направленного ответвителя прямой волны, показанного на рис. 1, имеют вид [10]:

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= 0, \\ S_{21} &= e^{-j\frac{(\beta_e + \beta_o)l}{2}} \cos\left(\frac{(\beta_e - \beta_o)l}{2}\right), \\ S_{31} &= 0; \\ S_{41} &= -je^{-j\frac{(\beta_e + \beta_o)l}{2}} \sin\left(\frac{(\beta_e - \beta_o)l}{2}\right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где β_e и β_o – постоянные распространения четной и нечетной моды связанных линий; l – длина связанной линии.

На рис. 1 приняты следующие обозначения портов: 1 – входной, 2 – проходной (прямой), 3 – развязанный (изолированный), 4 – связанный.

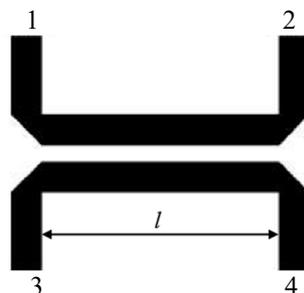


Рис. 1. Направленный ответвитель на связанных линиях с боковой связью
Fig. 1. Coupled-line coupler with side-link

Направленные ответвители прямой волны не могут использоваться в режиме ТЕМ. ТЕМ-волна (аббревиатура от слов Transverse ElectroMagnetic) – волна, у которой векторы электрического (E) и магнитного (H) полей перпендикулярны оси распространения и не имеют

продольных составляющих. Указанное ограничение объясняется тем, что для ТЕМ-волн постоянные распространения четной и нечетной мод равны, а из выражений (1) следует, что нет связи между портами 1 и 4. Таким образом, механизм прямой связи может проявиться только в несвязанных линиях передачи, таких как металлические волноводы, ребристые линии, диэлектрические волноводы, а также в квази ТЕМ-модовых линиях передачи, таких как микрополосковые линии на высоких рабочих частотах. В этих структурах линий передачи, как правило, фазовые скорости четной и нечетной мод не равны [10].

Из записи для параметра S_{41} в выражениях (1) видно, что полная мощность может передаваться между линиями передачи, если длина l связанной линии выбрана как

$$l = \frac{\pi}{|\beta_e - \beta_o|}. \quad (2)$$

Этот результат важен в том смысле, что даже при сколь угодно малых значениях разности постоянных распространения четных и нечетных мод полная мощность может передаваться между связанными линиями, если длина ответвителя выбрана согласно выражению (2). Теоретически в этом случае характеристики направленности и развязки (изоляции) ответвителя могут быть бесконечны. В работе [10] показано, что невозможно полностью передать мощность от одной линии к другой в случае направленных ответвителей с обратной волной. Между связанными линиями всегда существует некоторая ограниченная обратная связь. Сравнивая записи для S_{41} и S_{21} в выражениях (1), можно определить, что разность фаз между S_{41} и S_{21} составляет 90 град. Следовательно, волна на «связанной» линии сдвинута по фазе на 90 град с «прямой» волной.

Топология синтезируемого противонаправленного ответвителя на связанных полосковых линиях показана на рис. 2, а, на котором связанные линии имеют ширину w_1 и w_2 , и между этими связанными линиями установлены периодические шлейфы. В этой структуре w_s и l_s – это ширина и длина периодических шлейфов, а d_s – период шлейфов. На рис. 2, а приняты следующие обозначения портов ответвителя: 1 – входной, 4 – выходной (связанный), 2 и 3 – развязанные (изолированные).

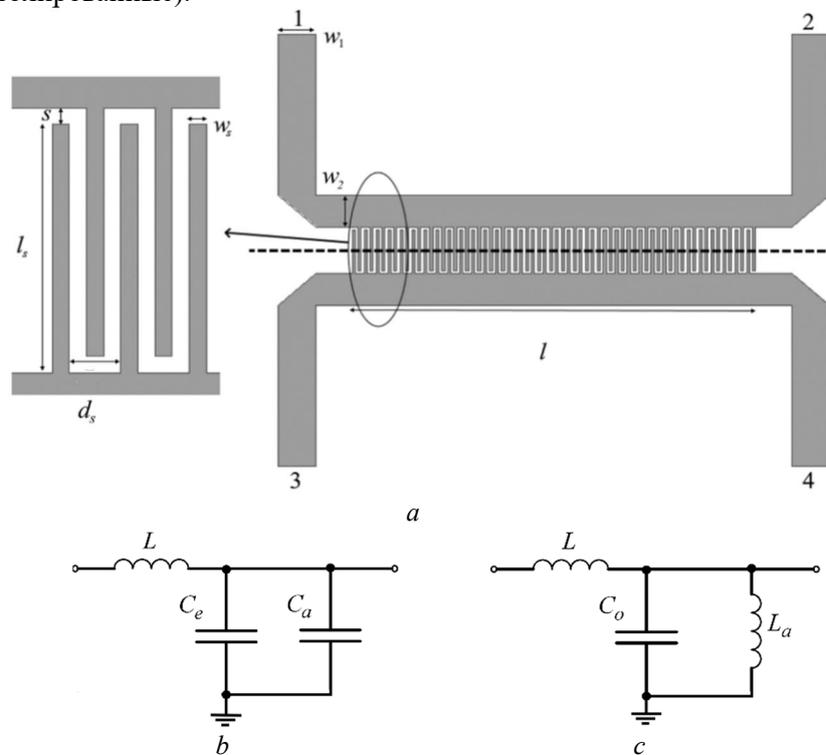


Рис. 2. Структура синтезируемого направленного ответвителя (кроссовера): а – топология ответвителя с периодическими шлейфами; б, с – эквивалентные электрические схемы связанной линии для одного периода шлейфов: четный (б) и нечетный (с) режимы

Fig. 2. The structure of synthesized directional coupler (crossover): а – coupler topology with periodic stubs; б, с – equivalent circuit diagrams of a connected line for one period of stubs: even (b) and odd (c) modes

На рис. 2, *b* и *c* показаны эквивалентные электрические схемы связанной линии на один период шлейфов для четной (*b*) и нечетной (*c*) моды (иначе режима). В этих схемах C_e и C_o – емкости связанной линии при возбуждении ее четной или нечетной модой, C_a и L_a – дополнительные распределенные шунтирующие емкость и индуктивность, а L – индуктивность связанных линий. Емкости C_e и C_o определяются как [10]

$$C_e = C_{11} = C_{22}, \quad C_o = C_{11} + 2C_{21} + 2C_{int}, \quad (3)$$

где C_{11} и C_{22} – емкости между одним полосковым проводником и землей в отсутствие другого полоскового проводника в плоской структуре (1 – основной, 2 – вспомогательный каналы); C_{21} – емкость между полосковыми проводниками вспомогательного и основного каналов в предположении отсутствия шлейфов и земляного проводника; C_{int} – емкость встречно-штыревого конденсатора между связанными полосковыми линиями.

Поскольку полосковые проводники связанных линий идентичны по размеру и расположению относительно заземляющего проводника, то $C_{11} = C_{22}$. Из теории линий передачи известно, что значение C_{11} можно рассчитать по формуле [10]

$$C_{11} = \frac{\sqrt{\epsilon_{re}} Z}{c}, \quad (4)$$

где ϵ_{re} – эффективная диэлектрическая проницаемость микрополосковой линии передачи с полосой шириной w ; Z – характеристическое сопротивление линии передачи; c – скорость света.

Встречно-штыревой конденсатор представляет собой многопалочную периодическую структуру, которая может использоваться в качестве последовательного конденсатора в технологии микрополосковых линий передачи [11]. Емкость C_{int} возникает в узком зазоре между полосковыми проводниками шунтирующих шлейфов и может быть рассчитана по формуле [11]

$$C_{int} = \frac{\epsilon'_{re}}{18\pi} (N-1) \frac{K(\kappa)}{K'(\kappa)} l_s \quad (\text{пФ}), \quad (5)$$

где ϵ'_{re} – эффективная диэлектрическая проницаемость полосы шириной w_s ; N – количество шлейфов; $[K(\kappa)/K'(\kappa)]$ – отношение полного эллиптического интеграла первого рода $K(\kappa)$ к его дополнению $K'(\kappa)$ [11]; l_s – длина периодических шлейфов, мм.

Дополнительные распределенные шунтирующие емкость (C_a) и индуктивность (L_a), включаемые в модели эквивалентных схем для четного и нечетного режимов, можно определить на основе теории линий передачи СВЧ диапазона по следующим формулам [10]:

$$\left. \begin{aligned} L_a &= \frac{1}{d_s} \left(\frac{Z_s}{\omega} \tan \left(\beta_s \frac{l_s + s}{2} \right) \right) \approx \frac{Z_s \beta_s (l_s + s)}{2\omega d_s}, \\ C_a &= \frac{1}{d_s} \left(\frac{1}{\omega Z_s} \tan \left(\beta_s \frac{l_s + s}{2} \right) \right) \approx \frac{\beta_s (l_s + s)}{2\omega d_s Z_s}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где Z_s и β_s – характеристическое сопротивление и фазовая постоянная шунтирующих шлейфов; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (f – частота электромагнитных колебаний).

Последовательные импедансы (Z_e и Z_o) и шунтирующие проводимости (Y_e и Y_o) моделей эквивалентных схем в четном (нижний индекс e) и нечетном (нижний индекс o) режимах определяются как [10]

$$\left. \begin{aligned} Z_e &= j\omega L, \quad Y_e = j\omega(C_e + C_a), \\ Z_o &= j\omega L, \quad Y_o = j\omega C_o + 1/j\omega L_a. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Согласно теории линий передачи СВЧ-диапазона постоянные распространения (γ_e, γ_o) и характеристические импедансы (Z_{ce}, Z_{co}) связанных линий передачи для четных и нечетных режимов находятся по формулам [10]:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_e &= \sqrt{Z_e Y_e} = j\omega\sqrt{L(C_e + C_a)} = j\beta_e, \\ \gamma_o &= \sqrt{Z_o Y_o} = j\omega\sqrt{L(C_o - 1/\omega^2 L_a)} = j\beta_o, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{ce} &= \sqrt{\frac{Z_e}{Y_e}} = \sqrt{\frac{L}{C_e + C_a}}, \\ Z_{co} &= \sqrt{\frac{Z_o}{Y_o}} = \sqrt{\frac{L}{C_o - 1/\omega^2 L_a}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Поскольку длина шлейфов относительно велика, значение C_{21} будет намного меньше, чем C_{11} и C_{int} . Тогда выражение (3) можно записать в виде

$$C_o \cong C_{11} + 2C_{int}. \quad (10)$$

Анализируя выражения (8), можно установить, что для НО на связанных полосковых линиях разность между β_e и β_o в рассматриваемой структуре оказывается большей, нежели в обычных структурах без шлейфов. Кроме того, этой разностью можно управлять с помощью длины шлейфов l_s . Для фиксированного уровня связи увеличение длины шлейфов l_s приводит к уменьшению связанной линии l (см. рис. 2, а).

В ответвителях на связанных линиях идеальное согласование входа при полном сопротивлении Z_c ($Z_{in} = Z_c$) обеспечивается при условии [10]

$$Z_c = \sqrt{Z_{ce} Z_{co}}. \quad (11)$$

В результате вычислений для направленного ответвителя получены следующие значения параметров элементов эквивалентных схем (см. рис. 2, b, c): $L = 1,8$ нГн, $L_a = 3,2$ нГн, $C_a = 0,1$ пФ, $C_e = 0,2$ пФ и $C_o = 1,8$ пФ.

Численные результаты и их обсуждение

Структура противонаправленного ответвителя на полосковых линиях с сильной боковой связью (0 дБ) получена на материале для печатных плат СВЧ-диапазона Neltec NH9350 толщиной 1,143 мм и диэлектрической проницаемостью 3,5. Толщина медного слоя составляла 35 мкм. Для хорошего согласования ширина микрополосковых линий передачи выбрана равной $w_1 = 2,54$ мм с волновым сопротивлением 50 Ом на центральной частоте $f_0 = 3$ ГГц. Согласно приводимым соотношениям, для обеспечения уровня связи (переходного ослабления) 0 дБ длина l и ширина $l_s + 2w_2$ структуры, показанной на рис. 2, а, были выбраны равными 27,14 мм и 3+2·2,2 мм, что составляло примерно $\lambda/4$ и $\lambda/13$ для центральной частоты $f_0 = 3$ ГГц, где λ – длина электромагнитной волны. Ширина w_s и период шлейфов d_s приняты равными: $w_s = 0,2$ мм, $d_s = 0,6$ мм. Расстояние между шлейфами и линиями передачи составляло $s = 0,2$ мм.

Предлагаемый ответвитель в конструктивном отношении оказался более компактным, нежели микрополосковый ответвитель, описанный в работе [4].

Для численного исследования конструкции направленного ответвителя был выбран метод конечных элементов. Используя численные расчеты матрицы рассеяния ответвителя (0 дБ, кроссовера), по точкам построены графики зависимости S-параметров от частоты (рис. 3). Индексы S-параметров записаны в соответствии с нумерацией портов, указанной на рис. 2, а.

Коэффициент передачи составил не менее минус 0,75 дБ в полосе пропускания 2,85...3,11 ГГц (примерно $f_0 \pm 5\%$). На частоте, близкой к центральной (2,98 ГГц), развязка S_{13} составила не менее 35 дБ. Сдвиг фазы электромагнитных колебаний на выходе 4 относительно входа 1 составил минус 1,7 град.

Описанный направленный ответвитель СВЧ-диапазона на полосковых линиях с высоким уровнем боковой связи (0 дБ), обеспечивающий передачу мощности в один порт, может быть использован в распределительных схемах, в которых нужно исключить пересечения линий передач.

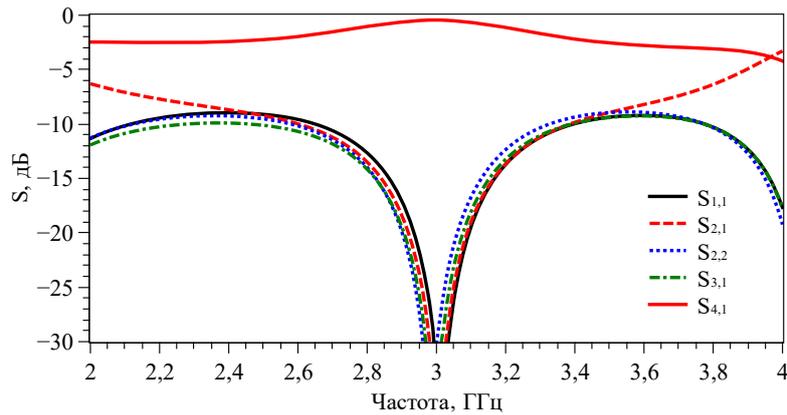


Рис. 3. Зависимость S -параметров матрицы рассеяния кроссовера от частоты
Fig. 3. Dependence of the S -parameters of the crossover scattering matrix on the frequency

Для синтеза сонаправленного ответвителя на связанных линиях выполнялся тот же анализ распространения четных и нечетных мод, что был описан выше. Применяя аналогичные периодические шлейфы, была получена топология 3-х дБ направленного ответвителя на связанных полосковых линиях (рис. 4). На рис. 4 приняты следующие обозначения портов: 1 – входной, 2 – проходной (прямой), 3 – развязанный (изолированный), 4 – связанный.

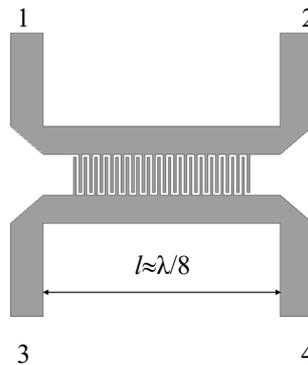


Рис. 4. Сонаправленный 3-х дБ ответвитель на связанных линиях
Fig. 4. Co-directional 3 dB coupled-line coupler

Для исследования сонаправленного ответвителя использовалась та же диэлектрическая подложка. Большинство размеров остались без изменений, как и в топологии, показанной на рис. 2, а. Были скорректированы период шлейфов d_s и расстояние между шлейфами и линиями передачи s . Получено $d_s = 0,62$ мм; $s = 0,21$ мм. Согласно проведенным расчетам длина l структуры составила 14 мм, что приблизительно равно $\lambda/8$ на центральной частоте 3 ГГц. Используя численные расчеты матрицы рассеяния рассматриваемого сонаправленного ответвителя, построены графики зависимости его S -параметров от частоты (рис. 5).

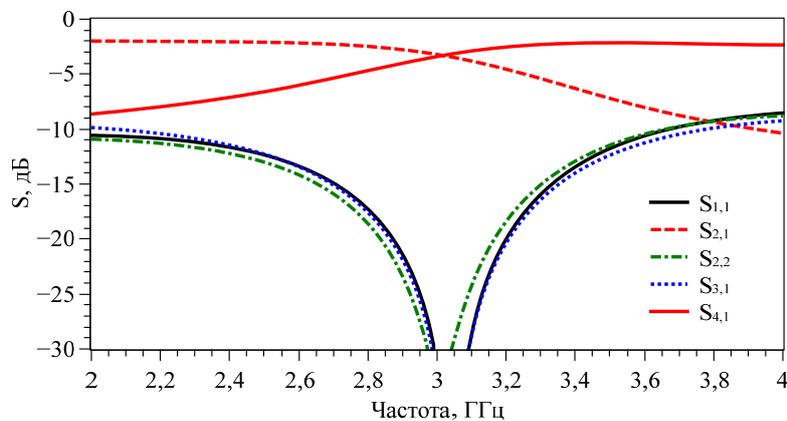


Рис. 5. Частотная зависимость S -параметров 3-х дБ ответвителя на связанных линиях
Fig. 5. Frequency dependence of S -parameters 3 dB coupled-line coupler

Анализ показал, что для сонаправленного ответвителя развязка между входным портом 1 и развязанным портом 3 достигала уровня не менее 40 дБ. В полосе пропускания 2,87...3,16 ГГц (примерно $f_0 \pm 5\%$) разбаланс амплитуд сигналов между рабочими (проходным и связанным) и входным портом составлял минус $(3,4 \pm 0,8)$ дБ.

Заключение

Рассмотрены направленные ответвители СВЧ диапазона на полосковых линиях с высоким уровнем боковой электромагнитной связи (0 и 3 дБ). Синтез ответвителей был основан на увеличении разности между фазовыми скоростями четной и нечетной мод. Это достигалось за счет использования в полосковой топологии ответвителей периодических шлейфов, которые размещались между связанными полосковыми линиями.

Расчет эквивалентных электрических схем связанной линии для одного периода шлейфов с учетом четных и нечетных мод позволил определить параметры и размеры топологии и сделать некоторые выводы о свойствах синтезируемых ответвителей. Основными являются следующие:

- с увеличением уровня связи размер ответвителя увеличивается;
- с увеличением длины шлейфов пропорционально уменьшается длина ответвителя;
- для фиксированного уровня связи площадь ответвителя (представляющая собой произведение длины шлейфов на длину связанной линии) оставалась примерно постоянной величиной.

Синтезированный противонаправленный ответвитель СВЧ-диапазона на полосковых линиях с высоким уровнем боковой связи (0 дБ) в конструктивном отношении является более компактным, нежели микрополосковый ответвитель, описанный в работе [4]. Этот направленный ответвитель обеспечивает передачу входной мощности в один порт и при проектировании СВЧ-техники может быть использован в распределительных схемах, в которых нужно исключить пересечение линий передачи. Также выполнен синтез сонаправленного 3-х дБ ответвителя на связанных полосковых линиях для средней частоты 3 ГГц. Ответвитель является компактным, имеет небольшой разбаланс амплитуд основного и вспомогательного каналов и характеризуется достаточно высокой развязкой с изолированным (развязанным) портом.

Список литературы

1. Малорацкий Л.Г. *Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ*. Москва: Сов. радио; 1976.
2. Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н. *Микроэлектронные устройства СВЧ: учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов*. Москва: Высшая школа; 1988.
3. Wu Y., Sun W., Leung S.-W., Diao Y., Chan K.-H. and. Siu Y.-M. Single-layer microstrip high-directivity coupled-line coupler with tight coupling. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2013;61(2):746-753. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2235855.
4. Fujii T., Ohta I. Size-reduction of coupled-microstrip 3-dB forward couplers by loading with periodic shunt capacitive stubs. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2005:1235-1238. DOI: 10.1109/MWSYM.2005.1516900.
5. Hirota N., Tahara Y., Yoneda N. A compact forward coupler using coupled composite right/left-handed transmission lines. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2009;57(12):3127-3133. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2034304.
6. Hsu S., Wu T. A novel microstrip forward directional coupler based on an artificial substrate. *European Microwave Conference (EuMC)*. 2010:926-930. DOI: 10.23919/EUMC.2010.5616998.
7. Liu H., Fang S.-J., Wang Z., and Zhou Y. Miniaturization of trans-directional coupled line couplers using series inductors, *Progress In Electromagnetics Research C*. 2014;46:171-177. DOI: 10.2528/PIERC13122201.
8. Liu H., Fang S.-J., Wang Z., and Fu S. Analysis and implementation of a dual-band coupled-line trans-directional coupler. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Exp. Briefs*. 2020;67(3):485-490. DOI: 10.1109/TCSII.2019.2918767.
9. Ikalainen K., Matthaei L. Wide-band, forward-coupling microstrip hybrids with high directivity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1987;35(8):719-725. DOI: 10.1109/TMTT.1987.1133737.
10. Mongia R., Bahl I., Bhartia P. *RF and Microwave Coupled-Line Circuits*. Norwood: Artech House; 1999.
11. Bahl I. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*. Boston: Artech House; 2003.

References

1. Malorackij L.G. [*Mikrominiatyurizaciya elementov i ustrojstv SVCh*]. Moscow: Sov. radio; 1976. (in Russ.)
2. Veselov G.I., Egorov E.N., Alekhin Yu.N. [*Mikroelektronnyye ustrojstva SVCh: uchebnoe posobie dlya radiotekhnicheskikh specialnostei vuzov*]. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. (in Russ.)
3. Wu Y., Sun W., Leung S.-W., Diao Y., Chan K.-H. and. Siu Y.-M. Single-layer microstrip high-directivity coupled-line coupler with tight coupling. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2013;61(2):746-753. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2235855.
4. Fujii T., Ohta I. Size-reduction of coupled-microstrip 3-dB forward couplers by loading with periodic shunt capacitive stubs. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest.* 2005:1235-1238. DOI: 10.1109/MWSYM.2005.1516900.
5. Hirota N., Tahara Y., Yoneda N. A compact forward coupler using coupled composite right/left-handed transmission lines. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques.* 2009;57(12):3127-3133. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2034304.
6. Hsu S., Wu T. A novel microstrip forward directional coupler based on an artificial substrate. *European Microwave Conference (EuMC).* 2010:926-930. DOI: 10.23919/EUMC.2010.5616998.
7. Liu H., Fang S.-J., Wang Z., and Zhou Y. Miniaturization of trans-directional coupled line couplers using series inductors, *Progress In Electromagnetics Research C.* 2014;46:171-177. DOI: 10.2528/PIERC13122201.
8. Liu H., Fang S.-J., Wang Z., and Fu S. Analysis and implementation of a dual-band coupled-line trans-directional coupler. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Exp. Briefs.* 2020;67(3):485-490. DOI: 10.1109/TCSII.2019.2918767.
9. Ikalainen K., Matthaei L. Wide-band, forward-coupling microstrip hybrids with high directivity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 1987;35(8):719-725. DOI: 10.1109/TMTT.1987.1133737.
10. Mongia R., Bahl I., Bhartia P. *RF and Microwave Coupled-Line Circuits.* Norwood: Artech House; 1999.
11. Bahl I. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits.* Boston: Artech House; 2003.

Сведения об авторах

Фаняев И.А., к.т.н., доцент кафедры радиофизики и электроники Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины.

Information about the authors

Fanyaev I.A., PhD, Associate Professor at the Department of Radiophysics and Electronics of Francisk Skorina Gomel State University.

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
г. Гомель, ул. Советская, 104,
Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины;
тел. +375-44-754-01-57;
e-mail: fanyaev@gmail.com
Фаняев Иван Александрович

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovetskaya str., 104,
Francisk Skorina
Gomel State University;
tel. + 375-44-754-01-57;
e-mail: fanyaev@gmail.com
Fanyaev Ivan Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-14-22>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.934.2+534.784

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ДПФ-МОДУЛИРОВАННОГО БАНКА ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМАХ СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМ УСИЛЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Н.С. САНЬКО, М.И. ВАШКЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 22 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью работы является исследование применимости ДПФ-модулированного банка фильтров в системах, требующих значительного усиления спектральных составляющих, таких как слуховой аппарат. Приведено описание метода анализа / синтеза звукового сигнала на основе кратковременного преобразования Фурье (КВПФ), используемого в большинстве систем обработки речевой информации. Показано, что ДПФ-модулированный банк фильтров является обобщением метода обработки на основе КВПФ. В системе анализ / синтез на основе ДПФ-модулированного банка фильтров входной сигнал разделяется на субполосы, проходя через банк фильтров анализа, далее происходит усиление сигнала в каждой субполосе, конечным этапом является восстановление сигнала с помощью банка фильтров синтеза. Однако в цифровых системах со значительным усилением спектральных составляющих из-за разницы в коэффициентах усиления для каждой субполосы результирующий сигнал после восстановления имеет искажения. В работе приводятся выражения для функции искажений и функции спектрального наложения, позволяющие оценить величину искажений, возникающих в системе анализ / синтез ДПФ-модулированного банка фильтров. Также предложены эффективные алгоритмы расчета функции искажений и функции спектральных наложений. В дальнейшем планируется разработка процедуры оптимизации ДПФ-модулированного банка фильтров, основанной на предложенных эффективных алгоритмах расчета функций искажений и спектральных наложений банка фильтров.

Ключевые слова: ДПФ-модулированный банк фильтров, усиление, КВПФ, слуховой аппарат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Санько Н.С., Вашкевич М.И. Исследование применимости ДПФ-модулированного банка фильтров в системах со значительным усилением спектральных составляющих. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 14-22.

RESEARCH OF APPLICATION OF DFT-MODULATED FILTER BANK IN SYSTEMS WITH SIGNIFICANT SPECTRAL COMPONENT AMPLIFICATION

NIKITA S. SANKO, MAXIM I. VASHKEVICH

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

Submitted 22 March 2021

© Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The purpose of this article is to investigate the application of DFT-modulated filter bank in systems with significant spectral component amplification like hearing aid. There is a description of analysis / synthesis method based on short-time Fourier transform (STFT), which is used in most systems of speech information processing. It is shown that DFT-modulated filter bank is a generalization of STFT-method. In analysis / synthesis system based on DFT-modulated filter bank, the input signal is divided into subbands, passing through the analysis filter bank then each subband is amplified and the last step is to reconstruct the signal with synthesis filter bank. However, in digital systems with significant spectral component amplification, the resulting signal is distorted after reconstruction because of amplification factor difference in each subband. The article provides expressions for the distortion and the aliasing functions, allowing to estimate the distortion value, which appears in analysis / synthesis system of DFT-modulated filter bank. Efficient algorithms for calculating the distortion and the aliasing functions are also offered. In future it is planning to develop a procedure for optimizing the DFT-modulated filter bank based on the proposed efficient algorithms for calculating distortion and spectral aliasing in the filter bank.

Keywords: DFT-modulated filter bank, gain, STFT, hearing aid.

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

For citation. Sanko N.S., Vashkevich M.I. Research of application of DFT-modulated filter bank in systems with significant spectral component amplification. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 14-22.

Введение

Одной из важных задач обработки речевых сигналов является создание систем повышения разборчивости речи для людей с тугоухостью. Как правило, для обработки сигнала в таких системах применяется метод анализа / синтеза с использованием банка фильтров [1–3]. Банк фильтров является цифровой системой, состоящей из секций анализа и синтеза [2] (рис. 1). Операции, выполняемые при синтезе сигнала, являются обратными операциями, выполняемыми при анализе [4]. При использовании в слуховых аппаратах в субполосах могут использоваться коэффициенты усиления (ξ_k) достаточно высокого уровня (до 60 дБ) [2–3], что может вносить искажения при синтезе (восстановлении) сигнала.

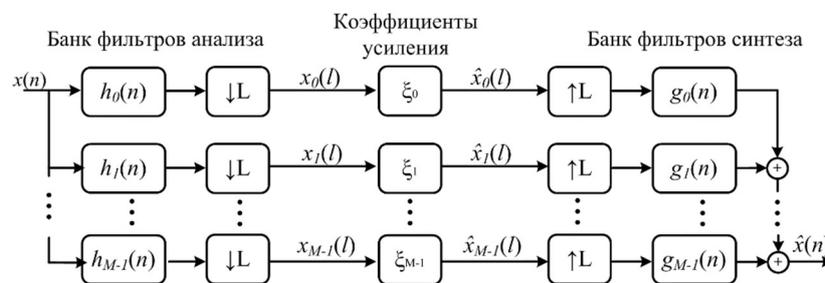


Рис. 1. Банк фильтров с применением коэффициентов усиления

Fig. 1. Filter bank using gain coefficients

В данной работе ставилась задача оценить эффективность использования ДПФ-модулированного банка фильтров в системах со значительным усилением спектральных составляющих. Для этого вначале показана связь ДПФ-модулированного банка фильтров с широко

используемым методом обработки сигнала на основе кратковременного преобразования Фурье. Приводятся теоретические обоснования метода расчета оконных функций для анализа и синтеза сигнала, позволяющих получить систему анализ / синтез с полным восстановлением (англ. *perfect reconstruction*). Для ДПФ-модулированного банка фильтров получающиеся оконные функции анализа и синтеза представляют собой фильтры-прототипы для секции анализа и синтеза соответственно. Далее в работе производится анализ функции искажений и функции спектральных наложений системы анализ / синтез на основе ДПФ-модулированного банка фильтров. Даются практические рекомендации по снижению уровня искажений в восстановленном сигнале.

Кратковременное преобразование Фурье

Кратковременное преобразование Фурье (КВПФ) (англ. *STFT – short-time Fourier transform*) широко используется для анализа, модификации и синтеза звуковых сигналов [4–5]. КВПФ можно рассматривать как преобразование со скользящим окном, которое имеет вид [5]

$$X(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)x(n + lL)e^{-j\omega_k n}, \quad (1)$$

где $x(t)$ – входной сигнал, $h(n)$ – ограниченная во времени оконная функция, а $\omega_k = 2\pi k/M$, $k = 0, 1, \dots, M-1$ – частотный индекс, L – временной шаг анализа (расстояние между соседними фреймами), l – номер фрейма анализа. Легко заметить, что (1) является вычислением дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для сигнала $h(n)x(n + lL)$. Таким образом, представление $X(k, l)$, получающееся в результате КВПФ, является последовательностью локализованных во времени спектров.

Выражение (1) представляет собой операцию *анализа*. Чтобы выполнять модификацию сигнала на основе КВПФ, необходимо иметь выражение и для *синтеза* сигнала. В идеальном случае синтез должен приводить к полному восстановлению сигнала (при условии, что спектральные составляющие остаются неизменными). Для восстановления необходимо использовать операцию обратного ДПФ (ОДПФ):

$$\hat{x}_l(n) = \text{IDFT}\{X(k, l)\} = h(n)x(n + lL), \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (2)$$

Это выражение записано относительно внутрифреймового индекса n , его можно переписать относительно глобального времени $t = n + lL$:

$$\hat{x}_l(t - lL) = h(t - lL)x(t), \quad lL \leq t \leq lL + N - 1, \quad (3)$$

Процесс восстановления сигнала производится методом перекрытия с суммированием (от англ. *OLA – overlap-add*), с применением синтезирующего окна $g(n)$ [5]:

$$\hat{x}_l(t) = \sum_l g(t - lL) \cdot \text{IDFT}\{X(k, l)\} = \sum_l g(t - lL)h(t - lL)x(t). \quad (4)$$

Таким образом, для восстановления всего сигнала $\hat{x}_l(t)$ каждый фрейм, сгенерированный ОДПФ, взвешивается на синтезирующее окно и добавляется к соседним окнам с перекрытием во времени [5]. В выражении (4) $x(t)$ может быть вынесен за скобки:

$$\hat{x}_l(t) = x(t) \left(\sum_l g(t - lL)h(t - lL) \right). \quad (5)$$

Значит, полное восстановление достигается, если $h(n)$ и $g(n)$ удовлетворяют ограничению

$$\sum_l g(t - lL)h(t - lL) = 1. \quad (6)$$

Рассмотрим один из подходов к получению окон, удовлетворяющих условию (6). Пусть есть окно $h_{PR}(n)$, удовлетворяющее условию полного восстановления, т. е.

$$\sum_l h_{PR}(t - lL) = 1. \quad (7)$$

Тогда для анализа может быть выбрана произвольная оконная функция $h(n)$, а синтезирующее окно должно вычисляться следующим образом:

$$g(n) = \frac{h_{PR}(n)}{h(n)}. \quad (8)$$

Известно, что свойству (7) отвечает треугольное окно, окна семейства Блэкмена – Харриса, Хэмминга и Ханна. Рассмотрим пример, когда в качестве окна $h_{PR}(n)$ выбирается окно Ханна. Для того чтобы избежать нулевых отсчетов в начале и конце, сгенерируем окно длины $N + 2$, а затем отбросим первый и последний отсчеты:

$$h_{PR}(n) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N + 2}\right), n = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

В качестве окна анализа $h(n)$ возьмем окно Хэмминга

$$h(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), n = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (10)$$

Окно синтеза $g(n)$ рассчитывается по выражению (8). На рис. 2 показаны полученные окна анализа и синтеза для значений параметров $L = 256, N = 2L$.

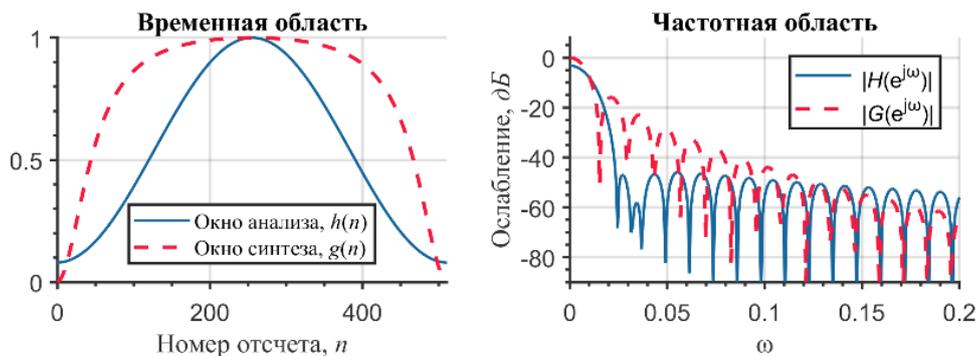


Рис. 2. Окна анализа и синтеза во временной и частотной областях
Fig. 2. Analysis and synthesis windows in time and frequency domain

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) анализирующего окна имеет типичный вид. В свою очередь, синтезирующее окно характеризуется довольно значительным уровнем первого бокового лепестка; при этом наблюдается постоянный наклон спада боковых лепестков.

Для иллюстрации обработки сигнала в системе анализ / синтез на основе КВПФ ($M = N = 64, L = 32$) использовался тестовый синусоидальный сигнал с частотой 500 Гц (длительность 0,25 с, частота дискретизации 8 кГц, см. рис. 3). Перекрытие фреймов в 50% процентов выбрано как наиболее выгодное с точки зрения минимизации вычислительных затрат.

В левой части рис. 3 изображена спектрограмма и временное представление синусоиды, подававшейся на вход системы анализ / синтез. По центру изображен восстановленный сигнал без внесения усиления, а справа показан восстановленный сигнал после субполосного усиления. В третьей, четвертой и пятой субполосах (центральные частоты 250, 500 и 750 Гц) были применены коэффициенты усиления, равные 10, 25 и 10 соответственно. На последнем графике рис. 3 наблюдаются искажения на частотах 250, 750, 1000 и 1250 Гц.

Анализируя приведенные графики, можно сделать вывод, что метод обработки сигнала на основе КВПФ вносит существенные нелинейные искажения при значительной модификации спектра сигнала. Чтобы оценить данные искажения, необходимо перейти к интерпретации метода КВПФ как банка фильтров.

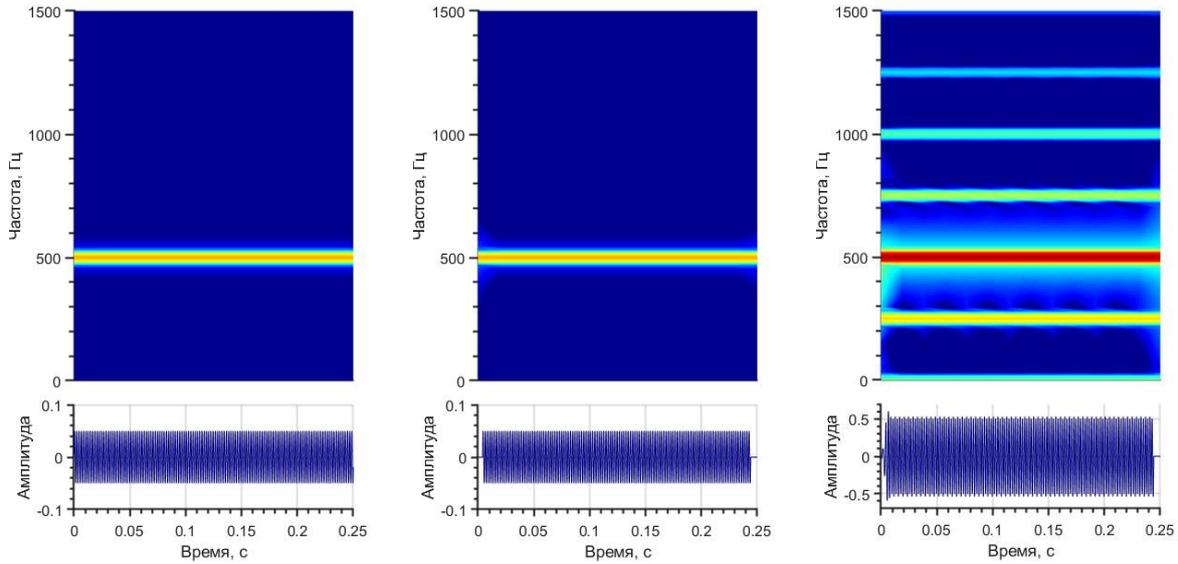


Рис. 3. Синусоидальный сигнал, проходящий через систему анализ / синтез с субполосным усилением
Fig. 3. Sinusoidal signal passing through the analysis / synthesis system with subband amplification

ДФФ-модулированный банк фильтров

Если в выражении (1) ввести обозначение

$$h_k(t) = h(-t)e^{j\omega_k t}, \quad (11)$$

то выражение примет вид (для простоты примем $L=1$)

$$X(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)x(n+l)e^{-j\omega_k n} = \sum_{n=0}^{N-1} h_k(-n)x(n+l) = \left|_{r=n+l} \right| = \sum_{r=l}^{N+l-1} x(r)h_k(l-r) = y_k(l). \quad (12)$$

Таким образом, (12) показывает, что представление $X(k, l)$ можно рассматривать как результат свертки входного сигнала с импульсными характеристиками банка фильтров (11).

Аналогичным образом синтезирующая часть схемы (см. выражение (4)) также может быть представлена в виде свертки субполосных сигналов с импульсными характеристиками банка фильтров синтеза [5]:

$$g_k(t) = g(t)e^{j\omega_k t}. \quad (13)$$

В результате КВПФ можно представить в виде структуры ДПФ-модулированного банка фильтров, для которого окно анализа $h(t)$ играет роль фильтра-прототипа. Если $H(e^{j\omega})$ Фурье-образ фильтра-прототипа $h(t)$, тогда по свойству частотного сдвига выражение (11) в частотной области примет вид

$$H_k(e^{j\omega}) = H^* \left(e^{j(\omega - \omega_k)} \right) = H^* \left(e^{j \left(\omega - \frac{2\pi k}{M} \right)} \right). \quad (14)$$

Таким образом, банк фильтров состоит из сдвинутых по частоте версий фильтра-прототипа. На рис. 4 представлены АЧХ банка фильтров анализа и синтеза (фильтры-прототипы получены по выражениям (8) – (10) для значений параметров $M = N = 64$).

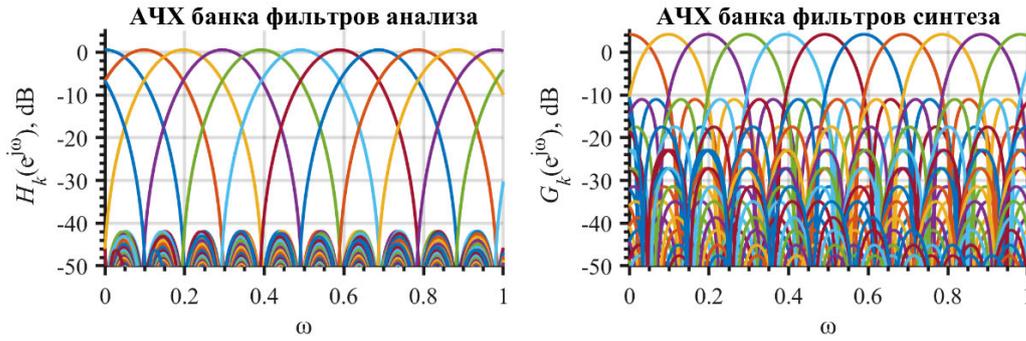


Рис. 4. АЧХ банка фильтров анализа и синтеза
Fig. 4. Frequency response of analysis and synthesis filter bank

Расчет функций искажения и спектрального наложения для системы анализ / синтез

Рассмотрим вопрос оценки искажений, возникающих в системе анализ / синтез (рис. 1), на основе ДПФ-модулированного банка фильтров (см. выражения (11) и (13)). Для этого перейдем к описанию банка фильтров в z -области. Пусть $H(z)$ и $G(z)$ представляют собой z -преобразования фильтров-прототипов для секции анализа и синтеза. В этом случае фильтры анализа и синтеза описываются как

$$H_k(z) = H(zW_M^k), \quad G_k(z) = G(zW_M^k), \quad k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (15)$$

где $W_M = e^{-j\frac{2\pi}{M}}$.

Выражение для субполосных сигналов, с учетом выражения (15) и процесса децимации, имеют следующий вид:

$$X_k(z) = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} H\left(z^{\frac{1}{L}} W_M^k W_L^m\right) X\left(z^{\frac{1}{L}} W_L^m\right). \quad (16)$$

Учитывая процесс интерполяции (повышения частоты дискретизации) в сочетании с выражениями (15) и (16), выходной сигнал банка фильтров представляется как [3]

$$Y(z) = \sum_{k=0}^{M-1} G(zW_M^k) \xi_k X_k(z^L) = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} \left[\sum_{k=0}^{M-1} \xi_k G(zW_M^k) H(zW_M^k W_L^m) \right] X(zW_L^m), \quad (17)$$

где ξ_k – коэффициент усиления.

Разделим внешнее суммирование в выражении (17) для представления передаточных функций. При $m=0$ и $z=e^{j\Omega}$ данное выражение будет представлять функцию искажений системы анализ / синтез:

$$T(e^{j\Omega}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \xi_k G\left(e^{j\left(\Omega - \frac{2\pi}{M}k\right)}\right) H\left(e^{j\left(\Omega - \frac{2\pi}{M}k\right)}\right). \quad (18)$$

Во всех остальных случаях при $m=1, \dots, L-1$ данное выражение будет являться функцией расчета спектрального наложения:

$$A(e^{j\Omega}) = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^{L-1} \left[\sum_{k=0}^{M-1} \xi_k G\left(e^{j\left(\Omega - \frac{2\pi}{M}k\right)}\right) H\left(e^{j\left(\Omega - \frac{2\pi}{M}k - \frac{2\pi}{L}m\right)}\right) \right]. \quad (19)$$

Непосредственный расчет выражений (18) и (19) является вычислительно затратой операцией, поэтому в работе предлагается эффективный алгоритм расчета $T(e^{j\Omega})$ и $A(e^{j\Omega})$. В алгоритме используется процедура БПФ (быстрого преобразования Фурье) для вычисления спектров фильтров-прототипов $h(n)$ и $g(n)$.

Предполагается, что функции $T(e^{j\Omega})$ и $A(e^{j\Omega})$ будут оцениваться на регулярной частотной сетке, состоящей из N_{pt} точек в диапазоне $\Omega \in [0, 2\pi]$ с шагом $2\pi/N_{pt}$. Число N_{pt} должно быть кратным числу каналов банка фильтров M . В этом случае вычисление функций $T(e^{j\Omega})$ и $A(e^{j\Omega})$ будет производиться согласно следующим алгоритмам.

Алгоритм 1. Расчет функции искажений $T(e^{j\Omega})$ системы анализ / синтез банка фильтров.

Вход: $\mathbf{h} = [h(n)]_{0 \leq n < N}$ – вектор коэффициентов фильтра-прототипа (секция анализа);

$\mathbf{g} = [g(n)]_{0 \leq n < N}$ – вектор коэффициентов фильтра-прототипа (секция синтеза);

Выход: $\mathbf{T} = [T(e^{j\Omega_v})]_{0 \leq v < N_{pt}}$ – вектор-строка значений функции искажений в точках частотной сетки $\Omega_v = 2\pi v/N_{pt}$;

Начало:

1. Дополнить нулями вектора \mathbf{h} и \mathbf{g} до длины N_{pt} .

2. Вычислить Фурье-образы фильтров прототипов при помощи БПФ:

$$\text{БПФ}\{\mathbf{h}\} = \mathbf{H} = [H_0(e^{j\Omega_v})]_{0 \leq v < N_{pt}},$$

$$\text{БПФ}\{\mathbf{g}\} = \mathbf{G} = [G_0(e^{j\Omega_v})]_{0 \leq v < N_{pt}}.$$

3. Создать вектор \mathbf{T} размера N_{pt} состоящий из нулей.

4. Выполнить следующий цикл:

for $v = 0, 1, \dots, N_{pt} - 1$

for $k = 0, 1, \dots, M - 1$

$$\mathbf{T}(v) = \mathbf{T}(v) + \xi_k \cdot \mathbf{G} \left(\left\langle v - l \cdot N_{pt} / M \right\rangle_{N_{pt}} \right) \cdot \mathbf{H} \left(\left\langle v - l \cdot N_{pt} / M \right\rangle_{N_{pt}} \right)$$

endfor

endfor

5. Сформировать вектор \mathbf{T} следующим образом:

$$\mathbf{T} = 1/L \cdot \mathbf{T}.$$

Конец

Алгоритм 2. Расчет функции $A(e^{j\Omega})$ спектрального наложения системы анализ / синтез ДПФ-модулированного банка фильтров.

Вход: аналогично Алгоритму 1.

Выход: $\mathbf{A} = [A(e^{j\Omega_v})]_{0 \leq v < N_{pt}}$ – вектор-строка значений функции спектрального наложения

в точках частотной сетки $\Omega_v = 2\pi v/N_{pt}$;

Начало:

1–2. Аналогично Алгоритму 1.

3. Создать вектор \mathbf{A} размера N_{pt} , состоящий из нулей.

4. Выполнить следующий цикл:

for $v = 0, 1, \dots, N_{pt} - 1$

for $m = 1, 2, \dots, L - 1$

for $k = 0, 1, \dots, M - 1$

$$\mathbf{A}(v) = \mathbf{A}(v) + \xi_k \cdot \mathbf{G} \left(\left\langle v - k \cdot N_{pt} / M \right\rangle_{N_{pt}} \right) \cdot \mathbf{H} \left(\left\langle v - k \cdot N_{pt} / M - m \cdot N_{pt} / L \right\rangle_{N_{pt}} \right)$$

endfor

endfor

endfor

5. Сформировать вектор \mathbf{A} следующим образом:

$$\mathbf{A} = 1/L \cdot \mathbf{A}.$$

Конец

В алгоритмах выражения вида $\langle a \rangle_b$ означает операцию нахождения остатка от деления a на b .

Результаты и их обсуждение

При прохождении сигнала через систему анализ / синтез на основе банка фильтров ($M = 64, L = 32$) в восстановленном сигнале наблюдаются искажения (см. рис. 3). Искажения появляются в результате процесса децимации / интерполяции (происходит неполное подавление компонент наложения спектров). Используя разработанные алгоритмы 1 и 2, были оценены функции искажения и спектрального наложения. На рис. 5 представлен график, на котором изображены искажения, вносимые банком фильтров, с использованием усиления и без него.

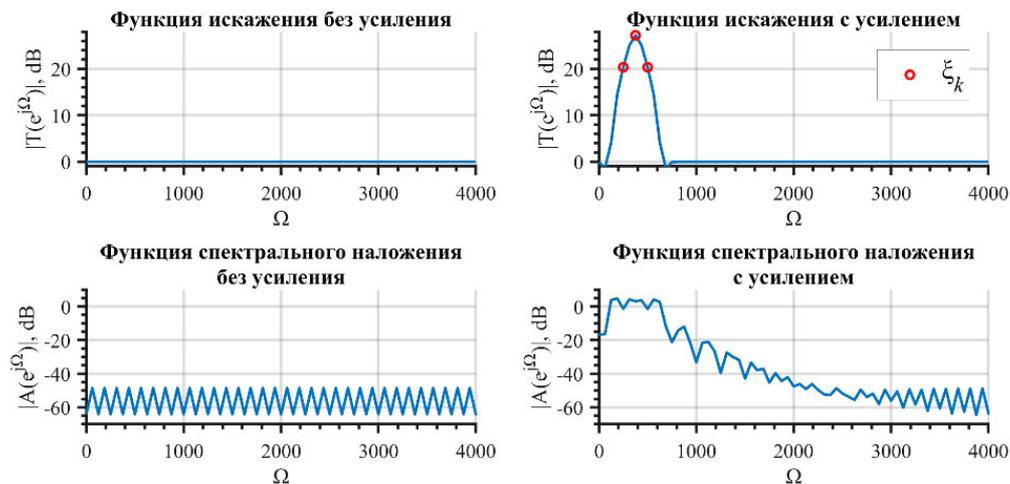


Рис. 5. Функции искажения и спектрального наложения без и с применением коэффициентов усиления
Fig. 5. Distortion and aliasing functions without and with amplification factor

Из приведенных графиков видно, что искажения, возникающие в системе, без использования коэффициентов усиления имеют достаточно малый уровень. Однако при использовании усиления появляются существенные искажения и наложения спектров, из-за чего в сигнале появляются паразитные компоненты. Для уменьшения искажений необходимо уменьшать коэффициент децимации / интерполяции банка фильтров L . Дополнительно требуется разработка подхода к расчету фильтров-прототипов ДПФ-модулированного банка фильтров для систем со значительным спектральным усилением.

Заключение

В работе проанализирована применимость ДПФ-модулированного банка фильтров в системах со значительным усилением спектральных компонент звукового сигнала. Было выявлено, что при использовании метода расчета фильтров-прототипов секций анализа и синтеза на основе оконных функций, позволяющих получить полное восстановление сигнала, наблюдаются достаточно высокие искажения в восстановленном сигнале. Экспериментальные результаты исследования наглядно демонстрируют, что при использовании значительных коэффициентов усиления субполосных сигналов на определенных частотах возникают паразитные компоненты. Таким образом, требуется минимизация искажений, которую возможно достичь разработкой специализированных фильтров-прототипов либо сокращением коэффициентов децимации / интерполяции в системе анализ / синтез на основе банка фильтров.

Список литературы

1. Вашкевич М.И., Азаров И.С., Петровский А.А. Цифровые банки фильтров для современных задач обработки звуковых сигналов. *Доклады БГУИР*. 2019; 2:100-111.
2. Schasse A., Gerkmann T., Martin R. Two-stage filter-bank system for improved single-channel noise reduction in hearing aids. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2014;23(2):383-393.
3. Kurbiel T., Göckler H. G., Alfsmann D. A Novel Approach to the Design of Oversampling Low-Delay Complex-Modulated Filter Bank Pairs. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2009: 1-13. DOI: 10.1155/2009/692861.
4. Клионский Д.М., Куприянов М.С., Орешко Н.И. Модели и алгоритмы обработки вибрационных сигналов и мониторинга широкого частотного диапазона. *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2016;5:25-41.
5. Goodwin M.M. The STFT, Sinusoidal Models, and Speech Modification. *Springer Handbook of Speech Processing*. 2008;229-258. DOI: 10.1007/978-3-540-49127-9-12.

References

1. Vashkevich M.I., Azarov I.S., Petrovsky A.A. [Digital filter banks for modern audiosignal processing tasks]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;(2):100-111. (In Russ)
2. Schasse A., Gerkmann T., Martin R. Two-stage filter-bank system for improved single-channel noise reduction in hearing aids. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2014;23(2):383-393.
3. Kurbiel T., Göckler H. G., Alfsmann D. A Novel Approach to the Design of Oversampling Low-Delay Complex-Modulated Filter Bank Pairs. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2009: 1-13. DOI: 10.1155/2009/692861.
4. Klionskiy D.M., Kupriyanov M.S., Oreshko N.I.. [Models and algorithms of vibrational signal processing and wideband monitoring]. *Izvestiya SPbGE TU LE TI*. 2016;5:25-41. (In Russ)
5. Goodwin M.M. The STFT, Sinusoidal Models, and Speech Modification. *Springer Handbook of Speech Processing*; 2008;229-258. DOI: 10.1007/978-3-540-49127-9-12.

Вклад авторов / Authors' contribution

Санько Н.С. разработал алгоритмы расчета функций искажения и спектрального наложения ДПФ-модулированного банка фильтров, провел экспериментальные исследования.

Вашкевич М.И. определил задачи исследования, принимал участие в подготовке текста статьи и интерпретации результатов экспериментов. /

Sanko N.S. developed algorithms for evaluation of the distortion and aliasing functions of the DFT-modulated filter bank and conducted experiments.

Vashkevich M.I. defined the objectives of the research, took part in the preparation of the text of the article and the interpretation of the results of the experiments.

Сведения об авторах

Санько Н.С., ассистент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Вашкевич М.И., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Sanko N.S., Assistant Lecturer at the Department of Computer Engineering of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Vashkevich M.I., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Engineering of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-84-78;
e-mail: sanko@bsuir.by
Санько Никита Сергеевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-84-78;
e-mail: sanko@bsuir.by
Sanko Nikita Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-23-31>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.531:621.039.537-037.87

СОСТАВ, СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ СЕРЕБРО- ВОЛЬФРАМ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА

Н.В. БОГУШ, А.А. ХМЫЛЬ, Л.К. КУШНЕР, Н.В. ДЕЖКУНОВ

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

Поступила в редакцию 24 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Исследовано влияние состава электролита и режима электролиза на состав, структуру и функциональные свойства композиционных электрохимических покрытий серебро-вольфрам. Установлено, что введение в состав электролита вольфрамата натрия и электроосаждение при воздействии ультразвука позволяет формировать содержащие оксиды вольфрама серебряные покрытия с уменьшенными размерами кристаллических зародышей. Применение ультразвуковых колебаний при электрохимическом осаждении расширяет возможности управления процессом нанесения покрытий и позволяет оптимизировать электрофизические и функциональные свойства композиционных электрохимических покрытий, получать более плотные мелкокристаллические осадки. Полученные покрытия также отличаются более высокой микротвердостью (на 10–50 %), износостойкостью (в 1,5–2 раза) и коррозионной стойкостью, а также обладают пониженным контактным сопротивлением. Показано, что использование ультразвуковых воздействий во время осаждения позволяет повышать допустимую плотность тока и способствует ускорению процесса осаждения.

Ключевые слова: серебро, ультразвуковые колебания, микротвердость, износостойкость, контактное электросопротивление, коррозионная стойкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках задания 2.3.11 ГПНИ Республики Беларусь «Функциональные и машиностроительные материалы и технологии, наноматериалы и нанотехнологии».

Для цитирования. Богуш Н.В., Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Дежкунов Н.В. Состав, структура и функциональные свойства композиционных электрохимических покрытий серебро-вольфрам, сформированных при воздействии ультразвука. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 23-31.

COMPOSITION, STRUCTURE AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF SILVER-TUNGSTEN COMPOSITION ELECTROCHEMISTRY COATINGS FORMED WITH THE HELP OF ULTRASOUND

NATALIA V. BOGUSH, ALEXANDER A. KHYML, LARISSA K. KUSHNER,
NIKOLAY V. DEZHKUNOV

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

Submitted 24 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Influence of electrolyte composition and deposition parameters on the composition, structure, physical-mechanical and functional properties of composite silver-tungsten coatings was studied. It was shown that addition of sodium tungstate in electrolyte and application of ultrasound at the electroplating leads to formation of silver layers that contains tungsten oxides and demonstrates lower crystalline nucleus. Application of ultrasound vibration at the electrochemical deposition increases ability for plating process control and allows to optimize electrophysical and functional properties of composite electrochemical coatings, to make dense fine crystalline thin layers. Obtained layers demonstrate increased microhardness (by 10–50 %), wear resistance (1,5–2 times), corrosion resistance and improved contact electrical resistance. It is shown that application of ultrasound effect to electrodeposition allows increased level of permissible current density and provides.

Keywords: silver, ultrasonic vibrations, microhardness, wear resistance, contact electrical resistance, corrosion resistance.

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

Gratitude. This work was carried out in the framework of assignment 2.3.11 of the State Scientific Inspection of the Republic of Belarus “Functional and engineering materials and technologies, nanomaterials and nanotechnologies”.

For citation. Bogush N.V., Khmyl A.A., Kushner L.K., Dezhkunov N.V. Composition, structure and functional properties of silver-tungsten composition electrochemistry coatings formed with the help of ultrasound. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 23-31.

Введение

Композиционные покрытия на основе серебра с тугоплавкими металлами, получаемые электрохимическим осаждением из водных растворов, находят широкое применение в различных изделиях электронной техники при формировании защитных токопроводящих слоев. Преимуществами метода являются высокая стабильность и управляемость процесса, возможность получения покрытий на подложках сложной формы, контроля структурных и эксплуатационных параметров формируемых осадков. Кроме состава электролита и параметров осаждения (плотность тока, температура, перемешивание и др.), также актуальным является исследование внешних факторов, оказывающих влияние на процесс получения покрытий.

При формировании тонкопленочных покрытий методом электрохимического осаждения широкое распространение для интенсификации процесса получили ультразвуковые колебания (УЗК) низкой частоты, что позволяет повысить скорость обмена электролита у катода и, соответственно, приводит к значительному увеличению предельной плотности тока [1]. Использование дополнительных методов интенсификации осаждения позволяет получать покрытия с более широким диапазоном эксплуатационных параметров и повышает производительность оборудования при практическом внедрении разработанной технологии.

Методика эксперимента

Для исследований в качестве базового использовался сульфатно-аммониевый электролит серебрения с добавлением вольфрамата натрия, концентрация которого в электролите составляет от 1,5 до 35 г/л [2]. Для интенсификации процесса электроосаждения использовали разработанную в Белорусской государственном университете информатики и радиоэлектроники экспериментальную ультразвуковую ванну с пьезокерамическим излучателем [3].

Анализ химического состава и структуры осадков, исследование физико-механических и функциональных свойств покрытий проводились в соответствии с методиками, приведенными в [2, 4]. Количественную оценку коррозионной стойкости покрытий осуществляли по изменению массы образцов после нахождения их в 3 % растворе NaCl в течение 72 ч [5].

Результаты исследований и их обсуждение

При изучении структуры металлических и композиционных покрытий установлено, что основными параметрами, определяющими структуру осадков, являются скорость образования и роста новых зародышей.

На рис. 1 представлены фотографии микроструктуры покрытий серебром и композиционных электрохимических покрытий (КЭП) серебро-вольфрам в зависимости от состава электролита и режимов электролиза, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

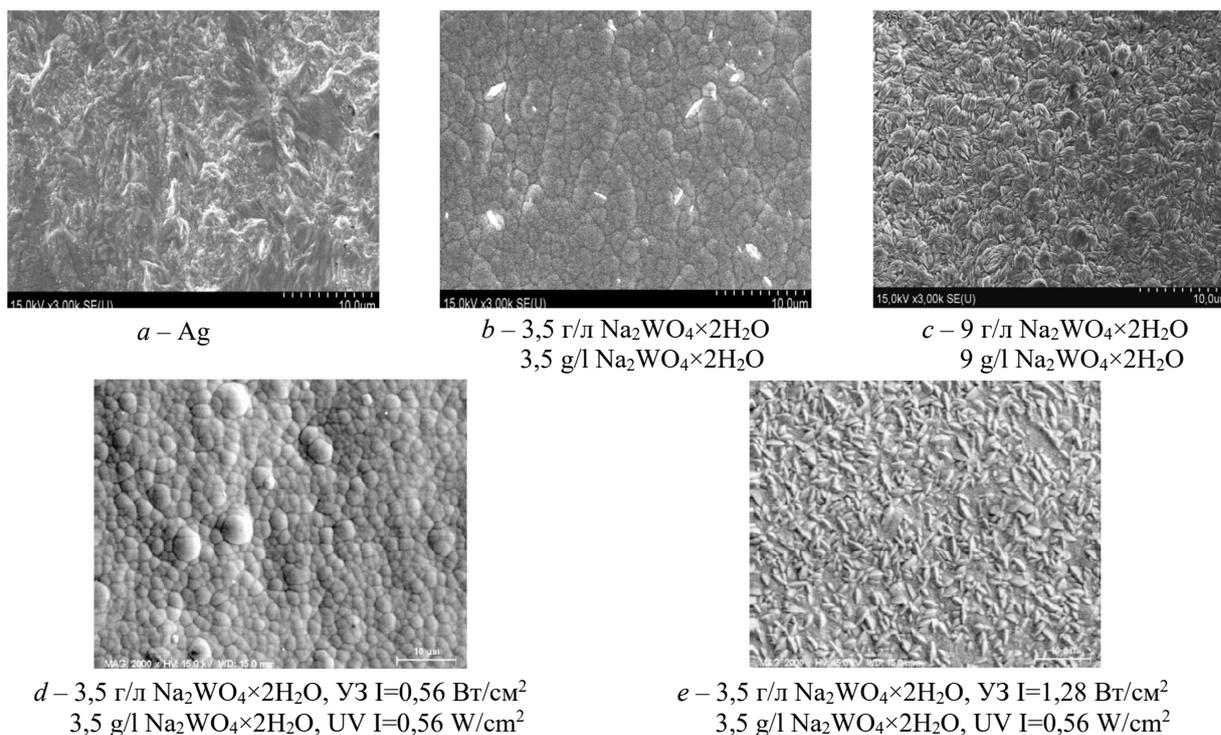


Рис. 1. Микроструктура покрытий на основе серебра ($i = 0,7 \text{ A/дм}^2$)

Fig. 1. Microstructure of the silver base coatings ($i = 0,7 \text{ A/дм}^2$)

Сравнительный анализ изображений кристаллической структуры на рис. 1 показывает, что серебряное покрытие, полученное на постоянном токе, имеет неоднородную развитую поверхность, крупнозернистое, сформировано из сросшихся кристаллитов различной величины.

Введение в электролит серебрения растворимой соли вольфрама существенно влияет на структуру поверхности осадков. Они становятся более мелкозернистыми с четко очерченными границами зерен. Повышение концентрации вольфрамата натрия в электролите от 3,5 до 9 г/л приводит к уменьшению размера кристаллитов (соответственно 1,15 и 1,04 мкм) при плотности тока $0,7 \text{ A/дм}^2$ и изменению структуры границ зерен от четко очерченных до сглаженных гранулированных (рис. 1).

Использование при гальваническом осаждении ультразвуковых колебаний интенсивностью 0,56 или 1,28 Вт/см² позволяет получать полублестящие плотноупакованные и мелкокристаллические покрытия (рис.1, *d, e*). Увеличение интенсивности ультразвука приводит к росту содержания вольфрама и кислорода в осадке и уменьшению размера зерна (табл. 1, рис. 1, *d, e*), что обусловлено повышением скорости диффузионных процессов в электролите и на поверхности осадка.

Результаты исследования элементного состава покрытий серебро-вольфрам с помощью ЭДХ-спектроскопии приведены на рис. 2 и в табл. 1.

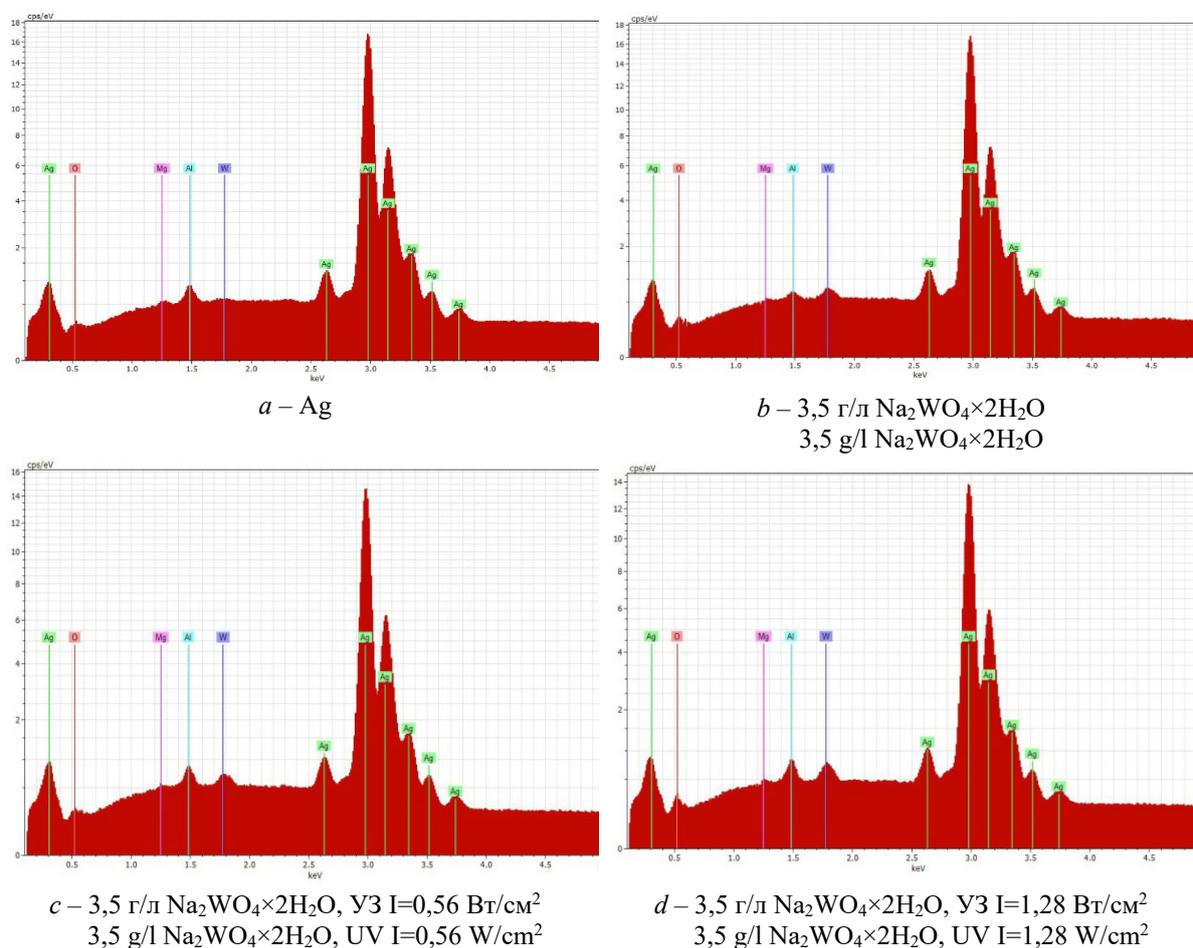


Рис. 2. ЭДХ-спектры покрытий на основе серебра
Fig. 2. EDX-spectrums of the silver base coatings

Таблица 1. Результаты ЭДХ-спектроскопического исследования элементного состава покрытий на основе серебра

Table 1. Results of the EDX-spectroscopic research of the silver base coatings elemental composition

Концентрация Na ₂ WO ₄ ×2H ₂ O, г/л Concentration Na ₂ WO ₄ ×2H ₂ O, g/l	Интенсивность ультразвука, Вт/см ² Ultrasound intensity, W/cm ²	Элементный состав покрытия Elemental composition of the coating					
		Ag		W		O	
		мас. % wt %	ат. % at %	мас. % wt %	ат. % at %	мас. % wt %	ат. % at %
0	0	99,29	95,38	00,00	00,00	0,71	4,62
3,5	0	98,24	93,84	0,88	0,49	0,88	5,67
9	0	97,44	92,54	1,53	0,85	1,03	6,60
3,5	0,56	98,35	93,84	0,76	0,43	0,89	5,74
3,5	1,28	96,89	89,89	1,63	0,89	1,47	9,22

Анализ элементного состава покрытий показал, что в серебряных пленках имеется небольшое количество примеси кислорода. При введении в состав электролита 3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ в покрытие установлено наличие 0,88 мас. % вольфрама, 0,88 мас. % кислорода, а остальное – серебро. Увеличение количества вольфрамата натрия в электролите приводит к закономерному повышению содержания вольфрама в покрытии, и между ними существует, как было установлено ранее [2], полулогарифмическая зависимость.

Изменения в структуре и составе покрытий, которые произошли при их формировании в ультразвуковом поле, оказали соответствующее влияние на физико-механические, функциональные и коррозионные свойства формируемых тонкопленочных материалов. Результаты изменения микротвердости покрытий серебро-вольфрам при воздействии ультразвука разной интенсивности во время осаждения приведены на рис. 3.

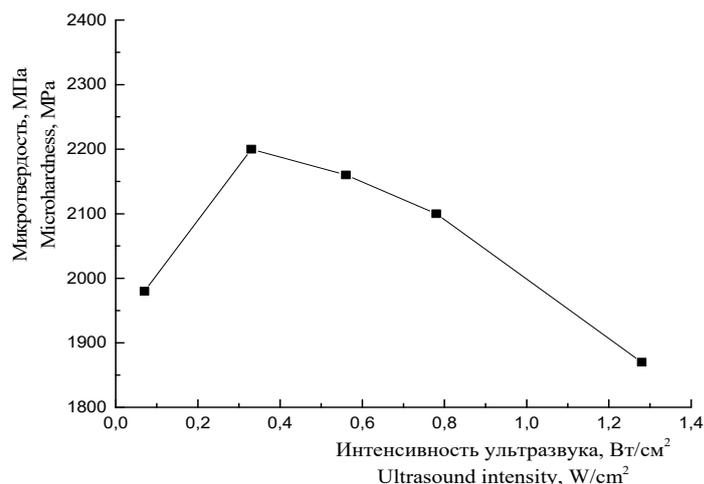


Рис. 3. Влияние ультразвука на микротвердость покрытий серебро-вольфрам (3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, $i = 0,7 \text{ A/дм}^2$)

Fig. 3. Influence of ultrasound on the silver-tungsten coatings microhardness (3,5 g/l $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, $i = 0,7 \text{ A/dm}^2$)

Введение в гальваническую ванну 3,5–9 г/л вольфрамата натрия увеличивает микротвердость с 1680 до 1900 МПа. Как следует из рис. 3, электроосаждение при воздействии ультразвука приводит к значительному повышению микротвердости покрытия серебро-вольфрам (до 1875–2200 МПа). При интенсивности ультразвука 0,2–0,5 Вт/см² можно увеличить твердость покрытий от 1900 до 2200 МПа. Такое существенное увеличение показателя объясняется формированием покрытий серебро-вольфрам с повышенным содержанием вольфрама и мелкокристаллической однородной по размеру зерна структурой. Как известно [6], малые размеры отдельных кристаллитов препятствуют скольжению плоскостей, вдоль которых происходит деформация кристаллов, и способствуют дисперсионному упрочнению покрытия.

Влияние состава электролита и плотности тока осаждения на износостойкость КЭП серебро-вольфрам представлено в [2]. Объемный износ серебряного покрытия при плотности тока 0,7 А/дм² составляет $3,85 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$, а коэффициент трения 0,31. Введение в состав электролита вольфрамата натрия позволяет значительно снизить величину объемного износа (до $0,75\text{--}1,5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$) и коэффициент трения до 0,18 [2]. Это можно объяснить формированием более мелкокристаллических осадков со сглаженным микрорельефом. Влияние ультразвука на объемный износ покрытия серебро-вольфрам представлено на рис. 4.

Показано, что использование ультразвука при электрохимическом осаждении покрытий серебро-вольфрам позволило формировать полублестящие плотные мелкокристаллические пленки с износостойкостью, в 1,5–2,2 раза превышающей износостойкость покрытий, полученных без ультразвука.

Причинами такого увеличения износостойкости являются существенное измельчение структуры КЭП, более плотная упаковка кристаллитов и увеличение опорной поверхности за счет сглаживания его микрорельефа, что обеспечивает мягкое скольжение контртела.

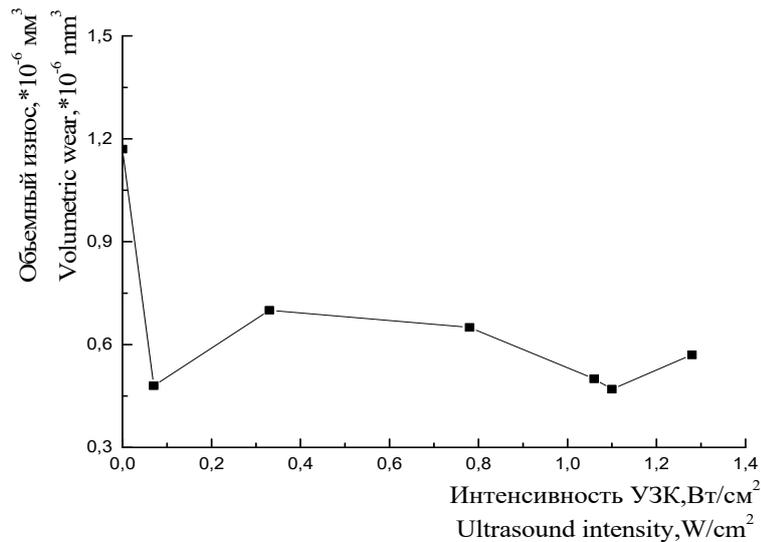


Рис. 4. Влияние ультразвука на износостойкость композиционных покрытий серебро-вольфрам (3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, $i = 0,7 \text{ A/dm}^2$)

Fig. 4. Influence of ultrasound on the silver-tungsten coatings wear resistance (3,5 g/l $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, $i = 0,7 \text{ A/dm}^2$)

Изменение величины контактного электросопротивления покрытий серебро-вольфрам, полученных при воздействии ультразвуковых колебаний, приведено в табл.2.

Таблица 2. Влияние интенсивности ультразвука и плотности тока на величину контактного электросопротивления покрытий серебро-вольфрам (3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$)

Table 2. Influence of ultrasound and current density on the silver-tungsten coatings contact resistance (3,5 g/l $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$)

Плотность тока, А/дм² Current density, A/dm²	Интенсивность ультразвука, Вт/см² Ultrasound intensity, W/cm²	Контактное электросопротивление, мОм Contact resistance, mΩ	Плотность тока, А/дм² Current density, A/dm²	Интенсивность ультразвука, Вт/см² Ultrasound intensity, W/cm²	Контактное электросопротивление, мОм Contact resistance, mΩ
0,7 (Ag)	0	0,7	0,3	0,56	1,64
0,7 (Ag)	1,28	0,7	0,7	0,56	1,51
0,7	0	2,4	1,5	0,56	1,67
0,3	0,07	1,77	0,3	1,28	1,60
0,7	0,07	1,70	0,7	1,28	1,75
1,5	0,07	1,78	1,5	1,28	1,63

Установлено, что применение ультразвука при осаждении КЭП на основе серебра снижает значение контактного электросопротивления покрытий серебро-вольфрам с 2,4 до 1,51 мОм при плотности тока 0,7 А/дм² по сравнению с покрытиями, осажденными на постоянном токе. При этом увеличение плотности тока при постоянной интенсивности ультразвука практически не влияет на контактное электросопротивление формируемых покрытий серебро-вольфрам.

Использование ультразвуковых колебаний в процессе электролиза оказывает существенное влияние на кинетику диффузионных и электрохимических процессов: снимает диффузионные ограничения, выравнивает скорости химической и электрохимической реакций, удаляет из катодной области продукты этих реакций, создает условия для формирования мелкокристаллической структуры покрытия, сглаживает микрорельеф его поверхности (рис. 1).

Влияние состава электролита и режимов осаждения на коррозионную стойкость покрытий на основе серебра (3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ в электролите) представлено в табл. 3.

Таблица 3. Влияние состава электролита и плотности тока на защитные свойства покрытий на основе серебра

Table 3. Influence of electrolyte composition and current density on the silver base coatings protective properties

Плотность тока, А/дм ² Current density, A/dm ²	Толщина покрытия, мкм Coating thickness, μm	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч) Corrosion rate, g/(m ² ·h)	
		серебро silver	серебро-вольфрам silver-tungsten
0,3	1	0,087	0,059
	3	0,090	0,056
	5	0,101	0,043
0,5	1	0,080	0,056
	3	0,079	0,031
	5	0,076	0,010
0,7	1	0,104	0,078
	3	0,087	0,073
	5	0,101	0,064
1	1	0,080	0,066
	3	0,083	0,024
	5	0,125	0,042
1,5	1	0,111	0,135
	3	0,142	0,128
	5	0,108	0,109

Анализ представленных данных показывает, что скорость коррозии покрытий серебро-вольфрам значительно ниже по сравнению с серебряным покрытием, полученным в аналогичных условиях. Это объясняется высокой плотностью упаковки кристаллических зародышей и снижением уровня межкристаллитной коррозии между ними, а также сглаженным микрорельефом поверхности. В табл. 4 приведены данные по влиянию УЗК на коррозионную стойкость КЭП на основе серебра.

Таблица 4. Влияние ультразвука на коррозионную стойкость КЭП на основе серебра (3,5 г/л Na₂WO₄×2H₂O)

Table 4. Influence of ultrasound on the silver base coatings corrosion resistance (3,5 g/l Na₂WO₄×2H₂O)

Плотность тока, А/дм ² Current density, A/dm ²	Толщина покрытия, мкм Coating thickness, μm	Скорость коррозии, г/(м ² ·ч) Corrosion rate, g/(m ² ·h)			
		интенсивность ультразвука, Вт/см ² ultrasound intensity, W/cm ²			
		0	0,07	0,56	1,28
0,3	1	0,059	0,076	0,097	0,069
	3	0,056	0,063	0,083	0,063
	5	0,043	0,083	0,104	0,055
0,7	1	0,078	0,090	0,097	0,153
	3	0,073	0,055	0,049	0,076
	5	0,064	0,053	0,09	0,076
1,5	1	0,135	0,055	0,097	0,055
	3	0,128	0,063	0,090	0,111
	5	0,109	0,090	0,083	0,090

Ультразвук неоднозначно влияет на коррозионную стойкость покрытий серебро-вольфрам. Оптимальные показатели получились при осаждении покрытий при интенсивности ультразвука 0,07 Вт/см². Снижение пористости и формирование покрытия с более однородной структурой при воздействии ультразвука, уменьшение содержания примесей, перемешивание и дегазация электролита приводят к повышению коррозионной стойкости, особенно при высокой плотности тока.

Анализ представленных данных показывает, что использование УЗК в процессе электролиза обеспечивает не только повышение качества и формирование тонкопленочных покрытий с высокой производительностью, но и возможность интенсификации процесса осаждения.

Заключение

В работе показано, что применение ультразвука и вольфрамата натрия в электролите существенно улучшает структуру КЭП. Структура осадков измельчается, они становятся более мелкокристаллическими и плотноупакованными со сглаженным микрорельефом поверхности, на которой исчезают границы между кристаллическими зёрнами. Использование ультразвуковых колебаний в процессе электролиза способствует увеличению скорости обновления электролита у поверхности катода, выравниванию скоростей протекающих на нем химических и электрохимических реакций, повышению предельной катодной плотности тока. Это способствует снижению контактного электросопротивления материала, повышению его коррозионной стойкости, а также экономии драгметалла.

Список литературы

1. Kushner L.K., Kuzmar I.I., Khmyl A.A., Dezkunov N.V. Nanocomposite nickel plating under non-stationary electrolysis. *Nanoscience and Technology: An International Journal. Special Issue: Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter*. 2019;10(4):355-363.
2. Богуш Н.В., Хмыль А.А., Кушнер Л.К. Структура и физико-механические свойства композиционных покрытий серебро-вольфрам, полученных электрохимическим осаждением. *Доклады БГУИР*. 2017;5(107):54-61.
3. Дежкунов Н.В. Оборудование для ультразвуковой интенсификации гальванических техпроцессов. *Материалы докладов III РНТС «Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий», 5–6 дек. 2013 г., Минск, Беларусь*. Минск: БГТУ; 2013:82-86.
4. Василец В.К. Влияние параметров электрического тока и ультразвуковых колебаний на микроструктуру и свойства электрохимических покрытий сплавом олово-висмут. *Проблемы физики, математики и техники*. 2016;3(28):7-12.
5. Хмыль А.А. Влияние ультразвука на коррозионную стойкость гальванических покрытий. *Современные средства связи: материалы XVII Международной научно-технической конференции, 16–18 окт. 2012 г., Минск, Беларусь*. Минск: ВГКС; 2012:150-151.

References

1. Kushner L.K., Kuzmar I.I., Khmyl A.A., Dezkunov N.V. Nanocomposite nickel plating under non-stationary electrolysis. *Nanoscience and Technology: An International Journal. Special Issue: Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter*. 2019;10(4):355-363.
2. Bogush N.V., Khmyl A.A., Kushner L.K. [Structure and physical-mechanical properties electroplated of AG-W composition coatings]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;5(107):54-61. (In Russ.)
3. Dezkunov N.V. [Equipment for ultrasonic intensification of galvanic technological processes]. *Materials of reports III RSTS "Creation of new and improvement of existing technologies and equipment, application of electroplating and their replacement coatings", 5–6 Dec. 2013, Minsk, Belarus*. Minsk: BSTU; 2013:82-86. (In Russ.)
4. Vasilec V.K. [Influence of parameters of electric current and ultrasonic vibrations on the microstructure and properties of electrochemical coatings with a tin-bismuth alloy]. *Problems of physics, mathematics and technology*. 2016;3(28):7-12. (In Russ.)
5. Khmyl A.A. [Influence of ultrasound on the corrosion resistance of electroplated coatings]. *Modern means of communication: materials of XVII International scientific and technical conference, 16–18 oct. 2012, Minsk, Belarus*. Minsk: VGKS; 2012:150-151. (In Russ.)

Вклад авторов

Богуш Н.В. проводила экспериментальные исследования, обрабатывала результаты, разрабатывала методики эксперимента, принимала участие в обсуждении результатов.

Хмыль А.А. обеспечивал руководство исследованиями, принимал участие в обсуждении результатов.

Кушнер Л.К. принимала участие в планировании эксперимента, обработке результатов, обсуждении выводов по работе.

Дежкунов Н.В. разработал УЗ оборудование и методики осаждения в ультразвуковом поле.

Authors' contribution

Bogush N.V. conducted experimental researches, processed results, developed experimental methods, took part in discussing of the results.

Khmyl A.A. provided research guidance, took part in the discussion of the results.

Kushner L.K. took part in planning of the experiment, processing the results, discussing the conclusions of the work.

Dezhkunov N.V. developed ultrasonic equipment and deposition methods in the ultrasonic field.

Сведения об авторах

Богущ Н.В., научный сотрудник НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Хмыль А.А., д.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кушнер Л.К., старший научный сотрудник НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дежкунов Н.В., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 5.2 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. +375-17-293-22-09;
e-mail: nbogush@bsuir.by
Богущ Наталья Валерьевна

Information about the authors

Bogush N.V., Researcher of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Khmyl A.A., D.Sc., Professor of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kushner L.K., Senior Researcher of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dezhkunov N.V., PhD, Assistant Professor, Head of the Laboratory 5.4 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-22-09;
e-mail: : nbogush@bsuir.by
Bogush Natalia Valerievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-32-41>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2:53.096

СТАБИЛИЗАЦИЯ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОТЖИГЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТРУКТУР ДИОДОВ – ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА

В.В. БУСЛЮК¹, В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ², В.В. БАРАНОВ³, С.С. ДЕРЕЧЕННИК¹,
В.С. ПРОСОЛОВИЧ⁴

¹Брестский государственный технический университет (г. Брест, Республика Беларусь)

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

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

⁴Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15 апреля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Стабилизация остаточных точечных дефектов на финишных этапах изготовления шумовых диодов может быть обеспечена подбором соответствующих режимов отжига и среды его проведения. Предложен метод и технология снижения концентрации точечных дефектов в структуре *p-n*-перехода с учетом содержания в структурах примесей вторичных металлов, кислорода и азота. Установлено, что отжиг готовых структур и диодов генераторов шума в среде азота при температурах 450...600 °С в течение (80 ± 3) мин приводит к повышению спектральной плотности шума и значительному (почти двукратному) снижению ее неравномерности. Важнейшим результатом этого отжига является снижение разброса средних значений исследуемых параметров шума: по эффективному напряжению шума – на 61,2 %; по спектральной плотности – на 34,2 %; по граничной частоте сигнала – на 34,9 %; по нелинейности спектральной плотности – на 25,9 %. Это позволяет улучшить качество случайных числовых последовательностей в программно-аппаратных комплексах защиты информации.

Ключевые слова: технология диодов – генераторов шума, отжиг, твердотельная структура, примеси, дислокации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Буслюк В.В., Емельянов В.А., Баранов В.В., Дереченник С.С., Просолович В.С. Стабилизация шумовых параметров при отжиге высоколегированных структур диодов – генераторов шума. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 32-41.

STABILIZATION OF NOISE PARAMETERS DURING ANNEALING OF HIGHLY ALLOYED STRUCTURES OF NOISE DIODES

VIKTAR V. BUSLIUK¹, VICTOR A. EMELYANOV², VALENTIN V. BARANOV³,
STANISLAV S. DERECHENNIK¹, ULADISLAU S. PRASALOVICH⁴

¹*Brest State Technical University (Brest, Republic of Belarus)*

²*“INTEGRAL” Joint Stock Company (Minsk, Republic of Belarus)*

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

⁴*Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 15 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Stabilization of residual point defects at the finishing stages of noise diodes can be ensured by the selection of appropriate ignition modes and the environment of its conduct. The method and technology of reducing the concentration of point defects in the structure of *p-n*-transition, taking into account the content of impurities of secondary metals, oxygen and nitrogen is proposed. It has been established that the burning of ready-made structures and diodes of noise generators in nitrogen environments at temperatures of 450...600 °C for (80 ± 3) min leads to an increase in spectral noise density and a significant (twice) reduction of its unevenness. The most important result of this burn is a reduction in the spread of the average values of the noise parameters studied: by 61.2 % in effective noise voltage; spectral density by 34.2 %; at the boundary frequency of the signal by 34.9 %; in non-linear density by 25.9 %. This improves the quality of random numerical sequences in information protection software systems.

Keywords: technology of noise diodes, annealing, solid-state structure, impurities, dislocation.

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

For citation. Busliuk V.V., Emelyanov V.A., Baranov V.V., Derechennik S.S., Prasalovich U.S. Stabilization of noise parameters during annealing of highly alloyed structures of noise diodes. *Doklady BGUIR*. 2021; 19(6): 32-41.

Введение

Решение задачи создания криптографически случайных числовых последовательностей в аппаратно-программных комплексах защиты информации требует стабильного шума в широком диапазоне частот с заданными спектральными характеристиками. В качестве источников шума используются полупроводниковые диоды (диоды – генераторы шума, лавинно-пролетные диоды, стабилитроны). Для диодов – генераторов шума (ДГШ) критическими параметрами являются: спектральная плотность шума, ее нелинейность, граничная частота, а также средние значения эффективного напряжения шума. В связи с действием различных внешних факторов, особенно при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры в «жестких» условиях, требуется особая стабильность электрофизических параметров и гарантированная надежность изделий.

Причинами шума ДГШ являются микроплазменные образования в области пространственного заряда (ОПЗ) диодов, зависящие от неоднородностей структуры, дефектов, а также характера переноса тока в малых по площади (как правило, не более 500 мкм²) ОПЗ. Для стабилизации шума ранее проведены исследования и экспериментально установлено, что преимущественными дефектами структуры ДГШ являются неоднородности легирования и примесные вторичные атомы меди и железа [1], дислоцированные, вероятно, в междоузлиях кристаллов кремния, а также входящие в состав преципитатов и комплексов на их основе. Динамика их образования специфична для конкретной конструкции и технологии изготовления шумовых диодов.

Одним из способов геттерирования дефектов в структуре является термообработка [2]. С учетом значительного содержания кислорода в высоколегированных структурах ДГШ

стабилизация остаточных неравновесных собственных точечных дефектов (СТД) на финишных этапах изготовления может быть обеспечена подбором соответствующих режимов отжига и среды его проведения. Формирующиеся при термообработках неравновесные СТД существенно влияют на образование электрически активных центров, ответственных за процессы ударной ионизации и генерации-рекомбинации носителей зарядов в структурах с глубокими *p-n*-переходами¹. На рис. 1 приведен график зависимости концентрации кислородосодержащих термодоноров от температуры отжига, которая имеет выраженную область максимума в диапазоне температур 450...600 °С.

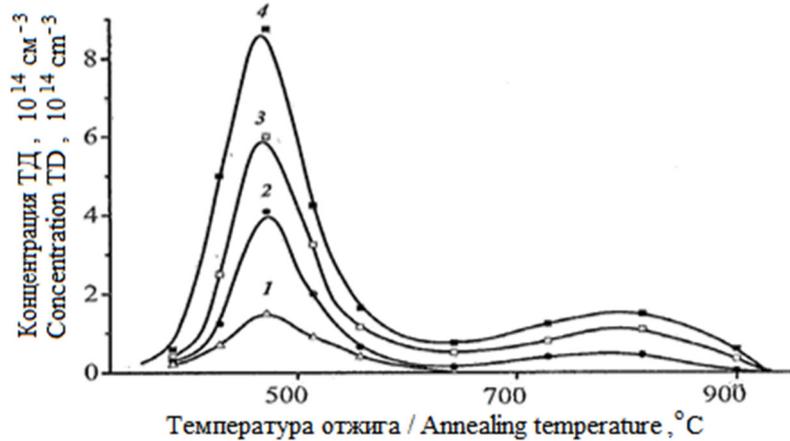


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации термодоноров за 1 ч отжига при исходной концентрации кислорода (см^{-3}): 1 – $2 \cdot 10^{18}$; 2 – $1,85 \cdot 10^{18}$; 3 – $1,6 \cdot 10^{18}$; 4 – $1,2 \cdot 10^{18}$ [3]

Fig.1. Temperature dependence of the concentration of thermal donors for 1 hour of annealing at the initial oxygen concentration (см^{-3}) of: 1 – $2 \cdot 10^{18}$; 2 – $1,85 \cdot 10^{18}$; 3 – $1,6 \cdot 10^{18}$; 4 – $1,2 \cdot 10^{18}$ [3]

Известно, что при отжиге структур при таких температурах в течение 1 ч наблюдается рост концентрации термодоноров, что приводит к образованию устойчивых зародышей кислородосодержащих преципитатов. При таком отжиге структур растет и концентрация межузельных атомов кремния с неопределенным положением в кристаллической решетке. Причиной такого явления могут быть значительные искажения решетки и, как следствие, формирование упругих напряжений на границе кремния с кислородными преципитатами вследствие практически двукратной разницы в размерах молекулы SiO_2 и атома Si [3, 4]. Межузельные атомы Si потенциально способны взаимодействовать с кислородом и азотом, образуя преципитаты и устойчивые комплексы. Наличие упругих напряжений способствует формированию преципитатов и комплексов вторичных примесных атомов и СТД, которые локализуются вблизи дислокаций и остаются затем стабильными в диапазоне сравнительно невысоких (до +70 °C) температур эксплуатации ДГШ.

Методика исследования влияния отжига на параметры диодов – генераторов шума

В работе исследованы электрофизические параметры кремниевых диодов – генераторов шума ND103, изготовленных по диффузионной технологии на основе подложек монокристаллического кремния марки КДБ 0,03 (111) 40-460. Глубина *p-n*-перехода, сформированного диффузией фосфора, составляла ~6 мкм. Содержание технологической примеси кислорода в монокристаллическом кремнии составляло $1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Отжиг структур производился в печи PP 40/85 фирмы Sokol-Therm Deutschland GmbH в среде азота. Отжигу в идентичных режимах подвергались как кристаллы шумовых диодов в отдельности, так и, собственно, ДГШ с такими кристаллами, герметизируемые в металлостеклянных корпусах (отжиг, совмещенный с герметизацией).

¹Соболев Н.А. *Физические основы инженерии дефектов в технологии кремниевых силовых высоковольтных и светоизлучающих структур: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.10.* Санкт-Петербург: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН; 2009: С. 85.

Время отжига подбиралось из условия минимального (33–35 мин) и максимально допустимого (установлено в ходе исследований) для герметизации металлостеклянного корпуса полупроводниковых приборов для поверхностного монтажа КД-34 (minimelf). При этом использовался стекло-капилляр JD38 фирмы CIT-Ireland Ltd. Оптимизация режимов отжига производилась по критерию максимального выхода годных ДГШ. Отжиг в диапазоне температур 450...600 °С производился в течение 40...80 мин (девять режимов, с увеличением времени герметизации для каждого на 5 мин и снижением температуры выдержки до 598 °С). Наилучшие результаты были достигнуты при длительности процесса отжига, совмещенного с герметизацией, составляющей 80 мин (допустимое отклонение ± 3 мин). Температурный профиль совмещенного с герметизацией отжига представлен на рис. 2.

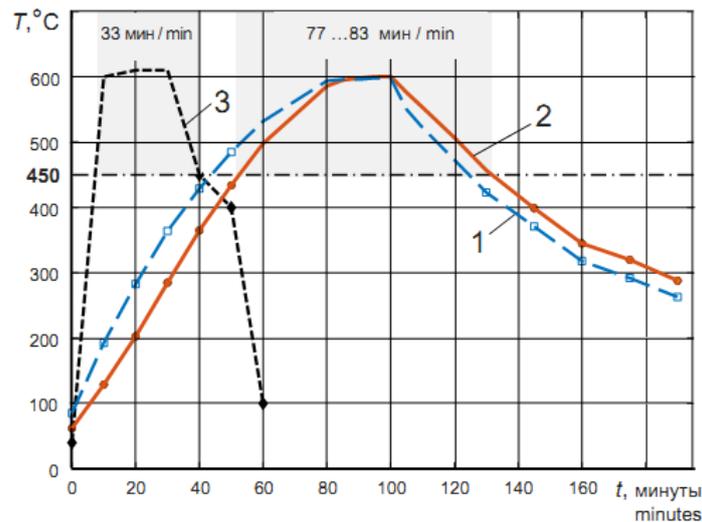


Рис. 2. Температурный профиль отжига, совмещенного с герметизацией: 1 – температура, задаваемая системой управления печи; 2 – фактическая температура в cassette герметизации-отжига; 3 – стандартный температурный профиль герметизации диодов в печи «Алунд» (для сравнения)

Fig. 2. Temperature profile of annealing combined with sealing: 1 – temperature set by the furnace control system; 2 – actual temperature in the sealing-annealing cassette; 3 – standard temperature profile of diodes sealing in the “Alund” furnace (for comparison)

Измерялись следующие электрические параметры шумового сигнала кристаллов и диодов: спектральная плотность напряжения шума (S_u) и ее нелинейность (δS_u), граничная частота сигнала ($f_{гп}$), эффективное напряжение шума ($U_{эф}$). Измерения проводились на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКИД (ЭКОН.441111.001, ОАО «Планар», Республика Беларусь) по встроенному алгоритму обработки 400 текущих отсчетов напряжения шумового сигнала, полученных с частотой дискретизации 50 МГц. Объем выборок для измерений кристаллов до отжига и после отжига – по 15 штук, после отжига, совмещенного с герметизацией – по 45 штук.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены значения электрических параметров кристаллов шумовых диодов ND103 до и после отжига, в табл. 2 – значения характеристик кристаллов шумовых диодов ND103 до отжига и ДГШ ND103L после отжига, совмещенного с герметизацией.

Как сами анализируемые параметры, так и их изменения в процессе отжига, носят случайный характер. Анализ средних значений параметров показывает, что отжиг практически одинаково влияет как на кристаллы, отжигаемые отдельно, так и на кристаллы в составе герметизируемого диода. Так, например, и для кристаллов, и для ДГШ спектральная плотность напряжения возрастает в 1,10 / 1,09 раза, ее нелинейность снижается в 1,74 / 1,75 раза, эффективное напряжение шума – в 1,05 / 1,0 раза, граничная частота – в 1,54 / 1,56 раза. Поэтому в дальнейшем статистический анализ с целью определения числовых характеристик измеренных случайных параметров осуществлялся только применительно к ДГШ как конечному изделию.

В табл. 3 представлены следующие числовые характеристики выборок измерений по каждому анализируемому случайному параметру: минимальное и максимальное значения, размах выборки, среднее, среднеквадратическое отклонение (СКО), медианное значение (медиана) выборки.

Таблица 1. Электрические параметры кристаллов ДГШ ND103 до и после отжига
Table 1. Electrical parameters of ND103 noise diode crystals before and after annealing

Номер кристалла Crystal number	Наименование и обозначение параметра Parameter name and notation							
	Спектральная плотность напряжения шума Noise voltage spectral density		Нелинейность спектральной плотности Spectral density nonlinearity		Граничная частота шумового сигнала Noise signal cutoff frequency		Эффективное напряжение шума Effective noise voltage	
	$S_u, \text{мкВ/Гц}^{1/2} (\mu\text{V/Hz}^{1/2})$		$\delta S_u, \text{дБ (dB)}$		$f_{гр}, \text{МГц (MHz)}$		$U_{эф}, \text{мВ (mV)}$	
	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing
1	58	58	1,64	1,06	3,76	2,49	144	126
2	48	53	1,93	0,90	4,20	2,93	128	122
3	60	68	1,60	1,09	3,47	2,01	145	140
4	49	55	1,93	1,10	4,05	2,59	132	125
5	58	58	1,47	0,83	3,71	2,39	144	126
6	70	77	1,76	0,80	3,12	1,95	164	147
7	55	64	1,73	0,88	3,71	2,05	137	132
8	34	–	1,56	–	5,03	–	101	–
9	48	52	1,61	0,78	4,20	3,03	127	122
10	61	62	1,68	0,94	3,51	2,44	152	133
11	58	59	1,53	0,92	3,56	2,59	143	132
12	52	59	1,89	0,89	4,00	2,73	136	132
13	52	57	1,70	0,90	3,96	2,69	133	129
14	57	60	1,50	1,19	3,61	2,59	143	132
15	61	63	1,65	1,21	3,61	2,34	149	138
Среднее Mean	54,7	60,4	1,679	0,964	3,833	2,487	138,5	131,1

Примечание. Кристалл № 8 после отжига был утерян.

Таблица 2. Электрические параметры кристаллов ДГШ ND103 до отжига, а также ДГШ ND103 после отжига, совмещенного с герметизацией

Table 2. Electrical parameters of ND103 noise diode crystals before and after annealing

Номер кристалла Crystal number	Наименование и обозначение параметра Parameter name and notation							
	Спектральная плотность напряжения шума Noise voltage spectral density		Нелинейность спектральной плотности Spectral density nonlinearity		Граничная частота шумового сигнала Noise signal cutoff frequency		Эффективное напряжение шума Effective noise voltage	
	$S_u, \text{мкВ/Гц}^{1/2} (\mu\text{V/Hz}^{1/2})$		$\delta S_u, \text{дБ (dB)}$		$f_{гр}, \text{МГц (MHz)}$		$U_{эф}, \text{мВ (mV)}$	
	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing	до отжига before annealing	после отжига after annealing
1	54	55	1,87	1,10	3,81	2,64	138	125
2	60	67	1,63	0,94	3,61	2,44	148	142
3	54	57	1,83	0,82	3,91	2,49	138	124
4	52	64	1,58	1,15	3,76	2,39	134	138
5	53	68	1,61	1,00	3,86	2,34	135	148
6	54	64	1,79	0,85	3,76	2,15	138	130
7	72	68	1,37	0,96	3,08	2,20	164	139
8	58	68	1,72	0,92	3,61	2,29	145	139

Окончание таблицы 2
End of Table 2

9	71	68	1,76	1,06	3,22	1,76	168	133
10	49	55	1,60	0,87	4,00	2,72	126	123
11	62	59	1,79	0,95	3,42	2,05	149	123
12	54	64	1,79	0,88	3,91	2,54	141	139
13	55	66	1,72	0,99	3,86	2,20	140	140
14	53	66	1,95	0,96	3,81	2,34	137	142
15	63	57	1,51	1,14	3,32	2,73	150	125
Среднее Mean	57,6	63,1	1,701	0,973	3,663	2,352	143,4	134

Таблица 3. Значения числовых характеристик случайных параметров кристаллов до отжига и диодов – генераторов шума ND103 после отжига

Table 3. Values of the numerical characteristics of the random parameters of crystals before annealing and noise diodes ND103 after annealing

Режим измерений Measurement mode	Наименование и обозначение числовых характеристик для выборок измерений случайных параметров Name and notation of numerical characteristic for samples of measurements of random values						Существенные изменения характеристик Significant changes of characteristics
	минимум minimum (min)	максимум maximum (max)	размах range (R)	среднее mean (m)	СКО standard deviation (σ)	медиана median (Me)	
Для выборки измерений спектральной плотности напряжения шума S_u , мкВ/Гц ^{1/2} ($\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$) For the sample of measurements of the voltage noise spectral density							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	34	72	38	56,6	7,26	55	рост: increase: m_{Su} : 9,9 %; падение: decrease: σ_{Su} : 34 %, R_{Su} : 34,2 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	52	77	25	62,2	5,52	64	
Для выборки измерений нелинейности спектральной плотности напряжения шума δS_u , дБ For the sample of measurements of the spectral density nonlinearity of the noise voltage δS_u , dB							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	1,37	1,95	0,58	1,70	0,147	1,72	падение: decrease: m_{Su} : 42,9 %, σ_{Su} : 23 %, R_{Su} : 25,9 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	0,78	1,21	0,43	0,97	0,113	0,96	
Для выборки измерений граничной частоты шумового сигнала $f_{гр}$, МГц (MHz) For the sample of measurements of the noise signal cutoff frequency							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	3,08	5,03	1,95	3,72	0,345	3,76	падение: decrease: m_{Su} : 35,5 %, σ_{Su} : 17,8 %, R_{Su} : 34,9 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	1,76	3,03	1,27	2,40	0,283	2,39	
Для выборки измерений эффективного напряжения шума $U_{эф}$, мВ (mV) For the sample of measurements of the effective noise voltage							
До отжига (кристаллы) Before annealing (crystals)	101	168	67	141,8	12,18	140,0	падение: decrease: m_{Su} : 6,1 %, σ_{Su} : 35,3 %, R_{Su} : 61,2 %
После отжига (ДГШ) After annealing (noise diodes)	122	148	26	133,1	7,88	132,5	

Исследование средних значений, среднеквадратических отклонений и медиан (табл. 4) показывает, что отжиг при температуре 450...600 °С приводит к изменению значений числовых характеристик, однако они не выходят за границы диапазона «трех сигм» ($\pm 3\sigma_x$) по каждому из них, что говорит о стабильности предложенного техпроцесса.

Таблица 4. Определение диапазона «трех сигм» для электрических параметров ДГШ ND 103L после отжига
Table 4. Determination of the three-sigma rule range for electrical parameters of ND 103L noise diodes after annealing

Наименование и обозначение параметра Parameter name and notation	Значения числовых характеристик Values of the numerical characteristics			
	среднее mean (m)	Утроенное СКО triple standard deviation (3σ)	нижняя граница диапазона lower range limit ($m-3\sigma$)	верхняя граница диапазона upper range limit ($m+3\sigma$)
Спектральная плотность напряжения шума Noise voltage spectral density S_{u} , мкВ/Гц ^{1/2} ($\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$)	62,20	16,57	45,63	78,77
Нелинейность спектральной плотности Spectral density nonlinearity δS_{u} , дБ (dB)	0,97	0,34	0,63	1,31
Граничная частота шумового сигнала Noise signal cutoff frequency $f_{гр}$, МГц (MHz)	2,40	0,85	1,55	3,25
Эффективное напряжение шума Effective noise voltage $U_{эф}$, мВ (mV)	133,09	23,63	109,46	156,72

В результате отжига при температуре 450... 600 °С в течение (80 ± 3) мин, в соответствии с приведенным графиком, произошло ожидаемое изменение средних значений исследуемых параметров: граничной частоты сигнала (снижение на 35,5 %), эффективного напряжения шума (снижение на 6,1 %), спектральной плотности шумового сигнала в среднечастотной области (увеличение до 9,9 %) при почти двукратном снижении ее неравномерности (снижение на 42,9 %). При этом заметно снизился разброс средних значений всех исследуемых параметров шума: по $U_{эф}$ – на 61,2 %, по S_{u} – на 34,2 %, по $f_{гр}$ – на 34,9 %, по δS_{u} – на 25,9 %.

Наиболее существенным результатом отжига явилось значительное снижение нелинейности спектральной плотности шума. На рис. 3 представлены гистограммы распределения нелинейности спектральной плотности шумового сигнала до отжига (белые прямоугольные столбцы справа) и после отжига ДГШ (цилиндрические столбцы слева), которые отображают полученный результат, а также допустимое значение по технологическим нормам (заштрихованная полоса на уровне 2,0 дБ). Это свидетельствует о повышении стабильности как самих параметров, так и предложенного техпроцесса в целом. Результирующие параметры ДГШ не выходят за пределы диапазонов, установленных техническими условиями и лучше параметров западных аналогов. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о положительном влиянии предложенного режима отжига на параметры ДГШ.

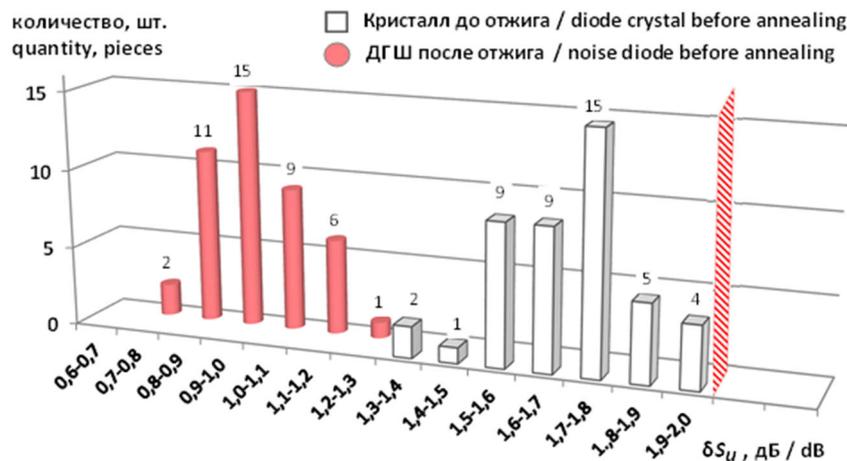


Рис. 3. Гистограммы распределения нелинейности спектральной плотности шумового сигнала до отжига кристаллов и после отжига ДГШ (заштрихованная полоса на уровне 2,0 дБ – предельно допустимое значение по технологическим нормам)

Fig. 3. Histograms of the distribution of the nonlinearity of the spectral density of the noise signal before annealing of crystals and after annealing of noise diodes (stripped shape at 2.0 dB shows the maximum allowed value according to the technology-specific rules)

Положительные изменения электрофизических параметров ДГШ, очевидно, обусловлены стабилизацией дефектно-примесного ансамбля структур при термообработке в азотсодержащей атмосфере в температурном интервале 450...600 °С. Как сказано выше, в кремнии, содержащем технологическую примесь кислорода высокой концентрации, в данной температурной области происходит формирование термодоноров, являющихся зародышами кислородсодержащих преципитатов. Данные преципитаты являются эффективными геттерами технологических примесей [5]. Такие примеси вводятся в материал при высокотемпературных технологических процессах формирования полупроводниковых приборов (например, диффузия) и являются одним из компонентов, обуславливающих лавинный пробой *p-n*-переходов. Конденсация на зародышах кислородных преципитатов (вследствие наличия вокруг преципитатов полей упругих напряжений) технологических примесей приводит к стабилизации дефектно-примесного ансамбля. Кроме того, нельзя исключать влияния азотсодержащей атмосферы на процессы дефектно-примесного взаимодействия при отжиге кристаллов. Так, в [6] установлено: при температурах термообработки 430...480 °С атомы азота активно взаимодействуют с вакансиями, что приводит к увеличению концентрации неравновесных собственных междоузельных атомов, являющихся одним из составных элементов зародышей кислородных преципитатов. Не следует также исключать вероятность того, что отжиг в азотсодержащей атмосфере приводит к азотированию пассивирующего оксида. В результате происходит насыщение оборванных связей на границе Si-SiO₂ [7], что в конечном итоге обуславливает уменьшение поверхностных токов утечки и стабилизацию электрофизических параметров ДГШ.

Исследования аппаратных средств генерации аналоговых и импульсных (цифровых) шумовых сигналов, построенных на основе шумовых диодов ND103 и их аналогов, показали, что достижение приемлемых вероятностных характеристик сигналов непосредственно связано с техническими параметрами диода [8]. В частности, увеличение нелинейности спектральной плотности напряжения шума приводит к ухудшению статистических характеристик потока двоичных данных [9]. С другой стороны, контроль статистических характеристик сигнала может быть использован для оперативной оценки качества шумового диода как источника физического шума [10].

Выводы

Таким образом, отжиг сильнолегированных структур в течение (80 ± 3) мин при температуре 450...600 °С на финишной стадии технологического процесса в присутствии быстродиффундирующих примесей, азота и кислорода приводит к стабилизации неравновесных собственных точечных дефектов и, как следствие, к улучшению электрофизических параметров ДГШ. В результате такой обработки снижается разброс средних значений основных контролируемых параметров ДГШ, а также повышается спектральная плотность шума и значительно (почти вдвое) снижается ее неравномерность. Улучшение качества ДГШ как источника физического шума позволяет обеспечить повышение равномерности распределения чисел при генерации криптографически случайных числовых последовательностей.

Список литературы

1. Буслюк В.В., Оджаев В.Б., Панфиленко А.К., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Филипеня В.А., Янковский Ю.Н. Электрофизические параметры диодов генераторов широкополосного шума. *Микроэлектроника*. 2020;49(4):314-320.
2. Лабунов В.А. Баранов И.Л., Бондаренко В.П., Дорофеев А.М. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники. *Зарубежная электронная техника*. 1983;11(270):3-66.
3. Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С. Кислородные преципитаты и формирование термодоноров в кремнии. *Физика и техника полупроводников*. 1998;32(6):712-713.
4. Просолович В.С., Янковский Ю.Н. *Дефектно-примесное взаимодействие в полупроводниках*. Минск: БГУ; 2009.
5. Vasil'ev Yu.B., Verezub N.A., Mezennyi M.V., Prosolovich V.S., Prostomolotov A.I., Reznik V.Ya. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-crystals large-diameter

- silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian microelectronics*. 2013;42(8):467-476.
6. Челядинский А.Р., Явид В.Ю., Венгерэк П. Накопление радиационных дефектов в кремнии при имплантации ионов азота. 5-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск; 2003: 206-208.
 7. Красников Г.Я. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов*. Москва: Техносфера; 2011.
 8. Разумейчик В.С., Буслюк В.В., Дереченник С.С., Поляков В.И., Лапич С.В. Оценка вероятностных характеристик случайных сигналов микроэлектронного шумового модуля. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2014;5(89):41-45.
 9. Пикуза М.О., Михневич С.Ю. Тестирование аппаратного генератора случайных чисел при помощи набора статистических тестов NIST. *Доклады БГУИР*. 2021;19(4):37-42.
 10. Железняк В.К., Раханов К.Я., Рябенко Д.С., Буслюк В.В., Ворончук С.И., Лешкевич И.В., Дереченник С.С. Концепция оценки для оперативного контроля источников шумового сигнала. *XVI научно-практическая конференция «Комплексная защита информации»*. Минск; 2011: 273-276.

References

1. Buslyuk V.V., Odzhayev V.B., Panfilenko A.K., Petlitsky A.N., Prosolovich V.S., Filipyena V.A., Yankovsky Yu. N. [Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes]. *Russian Microelectronics*. 2020;49(4):295-301.
2. Labunov V.A., Baranov I.L., Bondarenko V.P., Dorofeev A.M. [Modern gettering methods in semiconductor electronics technology]. *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika = Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika*. 1983;11:3-66. (In Russ.)
3. Vabishchevich N.V., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S. [Oxygen precipitates and the formation of thermal donors in silicon]. *Semiconductors*. 1998;32:640-641.
4. Prosolovich V.S., Yankovsky Yu.N. [*Defect-doping interaction in semiconductors: a course of lectures*]. Minsk: BGU; 2009. (In Russ.)
5. Vasil'ev Yu.B., Verezub N.A., Mezennyi M.V., Prosolovich V.S., Prostomolotov A.I., Reznik V.Ya. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-crystals large-diameter silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian microelectronics*. 2013; 42(8):467-476.
6. Chelyadinsky A.R., Yavid V.Yu., Vengerek P. [Accumulation of radiation defects in silicon upon implantation of nitrogen ions]. *Pyataya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Vzaimodeystviye izlucheniya s tverдыm telom» = 5th International Scientific Conference "Interaction of radiations with a solid"*. Minsk; 2003: 206-208. (In Russ.)
7. Krasnikov G.Ya. [*Design and technological features of submicron MOS transistors*]. Moscow: Tekhnosfera; 2011. (In Russ.)
8. Razumeichik V.S., Busliuk V.V., Derechennik S.S., Polyakov V.I., Lapich S.V. [Estimation of the probabilistic characteristics of random signals of a microelectronic noise module]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = VESTNIK Brest State Technical University*. 2014;6(5):41-45. (In Russ.)
9. Pikuza M.O., Mikhnevich S.Yu. [Testing a hardware random number generator using NIST statistical test suite]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(4):37-42. (In Russ.)
10. Zheleznyak V.K., Rakhanov K.Ya., Ryabenko D.S., Busliuk V.V., Voronchuk S.I., Leshkevich I.V., Derechennik S.S. [Assessment concept for operational control of noise signal sources]. *XVI nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Kompleksnaya zashchita informatsii" = XVI Scientific and Practical Conference "Comprehensive Information Security"*. Minsk; 2011: 273-276. (In Russ.)

Вклад авторов

Буслюк В.В. разработал методику, провел исследование влияния отжига на параметры шумовых диодов, выполнил обработку и анализ результатов.

Емельянов В.А. выполнил постановку задачи исследований, проработал вопросы внедрения предлагаемой технологии.

Баранов В.В. исследовал вопросы, связанные с азотированием пассивирующего оксида и с явлениями на границе кремний – оксид кремния.

Дереченник С.С. осуществлял научное руководство проведением исследований, участвовал в анализе полученных результатов, выполнил оценку влияния предложенной технологии на качество диода как источника шума.

Просолович В.С. выполнил анализ физических механизмов формирования термодоноров и геттерирования технологических примесей в высоколегированных структурах.

Authors' contribution

Busliuk V.V. developed the study methodology, studied the effect of annealing on the parameters of noise diodes, performed processing and analysis of the results.

Emelyanov V.A. carried out the formulation of the research problem, worked out the issues of adoption the proposed technology.

Baranov V.V. investigated issues related to the nitriding of the passivating oxide and the phenomena at the silicon-silicon oxide interface.

Derechennik S.S. supervised the research, participated in the analysis of the results obtained, assessed the impact of the proposed technology on the quality of the diode as a noise source.

Prasalovich V.S. performed an analysis of the physical mechanisms of the formation of thermal donors and gettering of technological impurities in highly doped structures.

Сведения об авторах

Буслюк В.В., заведующий лабораторией, доцент кафедры электронных вычислительных машин и систем Брестского государственного технического университета.

Емельянов В.А., д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси, главный специалист ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Баранов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дереченник С.С., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин и систем Брестского государственного технического университета.

Просолович В.С., к.ф.-м.н., доцент, заведующий НИЛ спектроскопии полупроводников, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

224017, Республика Беларусь,
г. Брест, ул. Московская, 267,
Брестский государственный
технический университет;
тел. +375-162-32-18-10;
e-mail: cm@brest.by
Дереченник Станислав Станиславович

Information about the authors

Busliuk V.V., Laboratory Head and Associate Professor at the Department of Computers and Systems of Brest State Technical University.

Emelyanov V.A., D.Sc., Professor, Corresponding Member of the National Academy of Science of Belarus, Principal Specialist of "INTEGRAL" Joint Stock Company.

Baranov V.V., D.Sc., Professor, Professor at the Department of Information and Computer Systems Design of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Derechennik S.S., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Computers and Systems of Brest State Technical University.

Prasalovich V.S., PhD, Associate professor, Head of the Laboratory of Semiconductor Spectroscopy and Associate Professor at the Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics of Belarusian State University.

Address for correspondence

224017, Republic of Belarus,
Brest, Moskovskaya str., 267,
Brest State Technical University;
tel. +375-162-32-18-10
e-mail: cm@brest.by
Derechennik Stanislav Stanislavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-42-50>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ, СОЗДАВАЕМОЙ ИЗЛУЧЕНИЯМИ АБОНЕНТСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СОТОВОЙ (МОБИЛЬНОЙ) СВЯЗИ ...4G/5G/6G В ЗДАНИЯХ

В.И. МОРДАЧЕВ

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

Поступила в редакцию 3 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Цель работы – обоснование методики оценки интенсивности электромагнитного фона, создаваемого множеством излучающих абонентских устройств мобильной связи в многоэтажных зданиях. Для известных эмпирических моделей распространения радиоволн в зданиях получены выражения для плотности распределения вероятности и математического ожидания плотности потока мощности электромагнитных полей, создаваемых внутри здания этими устройствами из различных областей внутреннего пространства здания: из ближней зоны с распространением радиоволн, аналогичным условиям свободного пространства; и из дальней зоны, для которой наряду с интенсивным затуханием радиоволн вследствие внутренних препятствий (стен, перекрытий и др.) в отдельных направлениях возможно и «квазиволноводное» распространение радиоволн вдоль коридоров и производственных помещений. Получены соотношения для средних уровней отдельных слагаемых электромагнитного фона, определяемых в виде скалярных сумм значений плотности потока мощности полей, создаваемых излучениями множеств источников как ближней зоны, так и дальней зоны в целом либо ее отдельных частей, характеризующихся различными условиями распространения радиоволн. Предложена методика оценки электромагнитного фона внутри здания сложной формы с аппроксимацией участков внутренней поверхности помещения, в котором располагается точка наблюдения, и внешней поверхности здания, во внутреннем пространстве которого случайно распределены источники излучений, соответствующими участками внутренних и внешних сферических поверхностей, стягивающими соответствующие телесные углы, в элементах пространства которых возможны различные пространственные плотности и мощности излучения источников и различные условия распространения радиоволн. Результаты могут быть использованы для анализа электромагнитной экологии помещений и электромагнитной безопасности населения при полномасштабном внедрении мобильной связи 4G/5G/6G, а также для анализа электромагнитной совместимости систем, использующих полосы частот мобильной связи на первичной и вторичной основе.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, 6G, многоэтажное здание, абонентское устройство, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, распространение радиоволн, электромагнитная безопасность.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В.И. Характеристики электромагнитной обстановки, создаваемой излучениями абонентского оборудования сотовой (мобильной) связи ...4G/5G/6G в зданиях. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 42-50.

CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT CREATED BY RADIATIONS OF USER EQUIPMENT OF ...4G/5G/6G CELLULAR (MOBILE) COMMUNICATIONS IN BUILDINGS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

Submitted 3 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The goal of the work is to substantiate the technique for assessing the intensity of electromagnetic background generated by the set of radiating user devices of mobile communications in multi-storey buildings. For known empirical models of radio wave propagation in buildings, expressions are obtained for the probability distribution density and expectation of the power flux density of electromagnetic fields generated inside building by these sources from various parts of the building's interior space: from the near zone with radio wave propagation conditions similar to free space; and from the far zone, for which, along with intense attenuation of radio waves due to internal obstacles, a «quasi-waveguide» propagation of radio waves along corridors and industrial premises is also possible in certain directions. Relationships are obtained for the average levels of individual components of the electromagnetic background, determined as scalar sums of power flux density values of the fields generated by the sets of radiating devices of both the near zone and the far zone as a whole or its individual parts, characterized by different conditions of radio wave propagation. A method is proposed for assessing the electromagnetic background inside buildings based on approximation of sections of the inner surface of the premises in which the observation point is located, and the outer surface of the building, in the inner space of which radiation sources are randomly distributed, by the corresponding sections of the inner and outer spherical surfaces that are the subtend areas of the corresponding solid angles, in space elements of which a different spatial densities and radiation powers of sources and different conditions of radio wave propagation are possible. The results can be used to analyze the electromagnetic ecology of habitat and the electromagnetic safety of population at the full-scale implementation of 4G/5G/6G mobile communications, as well as to analyze the electromagnetic compatibility of systems using frequency bands for mobile communications on a primary and secondary basis.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, 6G, multi-storey building, user's equipment, electromagnetic radiation, electromagnetic background, radio waves propagation, electromagnetic safety.

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

For citation. Mordachev V.I. Characteristics of the electromagnetic environment created by radiations of user equipment of ...4G/5G/6G cellular (mobile) communications in buildings. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 42-50.

Введение

Эволюция систем и услуг сотовой (мобильной) связи (СС) к четвертому (4G) и пятому (5G), а в перспективе – к шестому (6G) поколению сопровождается интенсивным ростом пространственной плотности абонентских устройств (АУ), электромагнитное излучение (ЭМИ) которых обеспечивает все многообразие беспроводных услуг телефонии и передачи данных. Эта плотность может достигать 10^5 АУ/км² в сетях 4G (IMT-Advanced), 10^6 АУ/км² в сетях 5G (IMT-2020) и 10^7 АУ/км² в перспективных сетях 6G [1, 2]. В силу большого разнообразия функций и объемов трафика передачи данных различных АУ при примерно одинаковой мощности их ЭМИ (21–23 дБм [3]) в периоды наибольшей нагрузки сетей СС средняя мощность ЭМИ (как и относительная продолжительность нахождения АУ в активном состоянии, т. е. в режиме излучения) может отличаться на несколько порядков. Тем не менее в силу очень высокой декларируемой пространственной плотности АУ СС 4G/5G/6G суммарная интенсивность создаваемого ими электромагнитного фона (ЭМФ) может превышать принятые в [4, 5] предельно допустимые уровни (ПДУ) и представлять опасность для населения [6–9].

Очевидной принципиальной особенностью максимальной пространственной концентрации АУ для реализации сервисов СС 4G/5G/6G является их объемное (3D) размещение в многоэтажных жилых, офисных и производственных зданиях. В то же время как в основных рекомендациях [1, 3 и др.], так и в известных исследованиях процессов формирования радиочастотного ЭМФ совокупностью ЭМИ абонентского оборудования и базовых станций СС [6–9 и др.] рассматривается лишь территориальное (2D) размещение АУ. В какой-то мере это может быть объяснено как трудностями объективного анализа процессов распространения радиоволн (РРВ) внутри зданий [10], так и тем, что внедрение основных сценариев реализации систем и услуг 5G находится лишь в начальной стадии. Тем не менее задача анализа характеристик ЭМФ, создаваемого совокупностью излучений АУ 4G/5G/6G при их случайном распределении по внутреннему пространству зданий, представляет все возрастающий интерес с точки зрения электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии среды его обитания и деятельности, а также электромагнитной совместимости систем, использующих полосы частот СС на первичной и вторичной основе.

Цель данной работы – системный анализ общих закономерностей формирования статистических характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО) в помещениях, образуемой множеством ЭМИ пространственно рассредоточенных АУ СС при различной степени насыщения ими внутреннего пространства зданий, и обоснование методики оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого излучающими АУ в многоэтажных зданиях.

Методика анализа

Анализ статистических характеристик интенсивности ЭМФ в рассматриваемом случае выполнен по традиционной методике [6–9], основанной на использовании известных эмпирических моделей условий РРВ в зданиях и равномерного случайного распределения излучающих АУ в пространстве, а также на определении интенсивности ЭМФ в форме скалярной суммы значений плотности потока мощности (ППМ) электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых отдельными АУ в точке наблюдения (ТН).

Модель условий РРВ. Принимая во внимание чрезвычайно сложный характер РРВ в зданиях, при решении данной задачи использованы следующие известные эмпирические модели этих условий РРВ:

1. Обобщенная эмпирическая модель затухания радиоволн [10, 11]:

$$L_t(R) = L_C (R/R_0)^{\nu}, \quad L_C = \text{const}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент, определяющий степень увеличения затухания радиоволн с увеличением расстояния до ТН и в усредненной форме отражающий влияние внутренних препятствий (стен, перекрытий, оборудования и т.п.) на процесс РРВ; R_0 – «эталонное» расстояние, определяемое с учетом особенностей расположения ТН внутри либо вне здания. Без учета «квазиволноводного» характера РРВ вдоль коридоров и помещений различного назначения в пределах прямой видимости (для этих условий $\nu \approx 1,6...1,8$), для частот основной части диапазона УВЧ и нижней части диапазона СВЧ $\nu \approx 4...6$ для РРВ внутри офисных и жилых зданий, $\nu \approx 2...3$ для РРВ в производственных зданиях, $\nu \approx 3...5$ для сотовой связи в условиях затенения городской застройкой для ТН вне помещений вблизи земной поверхности [11]. Величина R_0 определяется эмпирически для каждого случая с учетом взаимного расположения ТН и внутренних поверхностей помещения либо затеняющих элементов застройки.

2. Эмпирическая модель [12] (Ericsson indoor path loss model), являющаяся развитием модели (1) для многоэтажных зданий и частот излучения, близких к 900 МГц (что примерно соответствует частотам ЭМИ АУ в сетях mMTC 5G [3] и в полосах частот № 5, 6, 8, 12–14, 17–20, 26–28, 44, 68 LTE [13]), и характеризуемая различными значениями ν при различных расстояниях между ТН и АУ:

на расстояниях от $R_0 = 1$ м до $R_1 = 10$ м – модель (1) для РРВ в свободном пространстве с показателем степени $\nu = 2$; на расстояниях от $R_1 = 10$ м до $R_2 = 2R_1 = 20$ м – модель (1) степени $\nu = 3$; на расстояниях от $R_2 = 20$ м до $R_3 = 4R_1 = 40$ м – модель (1) степени $\nu = 6$; на расстояниях $R \geq R_3 = 4R_1 = 40$ м – модель (1) степени $\nu = 12$:

$$\left. \begin{aligned} Z &= P_e / (4\pi R^2), & R_0 \leq R \leq R_1 \\ Z &= R_1 P_e / (4\pi R^3), & R_1 \leq R \leq R_2 = 2R_1, \quad v = 3 \\ Z &= 2R_1^4 P_e / (\pi R^6), & R_2 = 2R_1 \leq R \leq R_3 = 4R_1, \quad v = 6 \\ Z &= 8192R_1^{10} P_e / (\pi R^{12}), & R_3 = 4R_1 \leq R \leq R_m \gg R_3, \quad v = 12 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где Z , Вт/м², – ППМ ЭМП в ТН, создаваемая АУ с эквивалентной изотропной излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e , удаленным на расстояние R от ТН.

Модель пространственного размещения АУ и ТН. Будем рассматривать случайное размещение АУ со средней плотностью ρ_e , АУ/м³, во внутреннем пространстве многоэтажного здания. В помещении, в котором находится ТН, располагается также некоторое количество АУ; условия РРВ между ТН и этими АУ можно считать соответствующими (2). Для ЭМП АУ вне этого помещения, но располагаемых внутри здания, следует использовать модель (1) с параметром $v \neq 2$, либо модель (2). В качестве первичной модели пространственного размещения ТН и множества АУ рассматривается модель, изображенная на рис. 1.

В этой модели R_m – «эталонное» расстояние, ограничивающее область свободного РРВ между ТН и АУ, R_M – радиус области радиовидимости АУ из ТН; для АУ за ее пределами уровень сигналов этих АУ в ТН меньше порогового уровня (например, пороговой чувствительности их радиоприема). Для сигналов АУ из кольцевой области, ограниченной радиусами R_m и R_M , условия РРВ в ТН усложняются за счет присутствия многочисленных препятствий в виде стен, межэтажных перекрытий и т. п.; для этих условий $v > 2$.

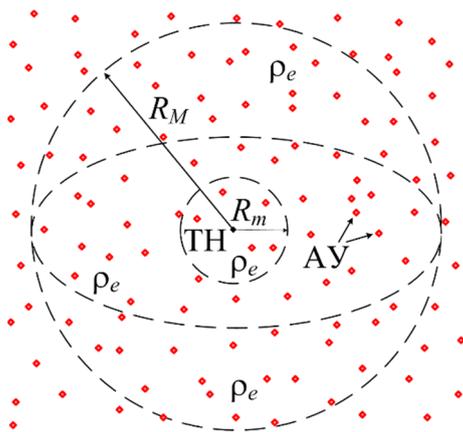


Рис. 1. 3D-модель пространственного размещения точки наблюдения (ТН) и множества АУ

Fig. 1. 3D-model of the spatial location of the observation point (OP) and the set of user equipment (UE)

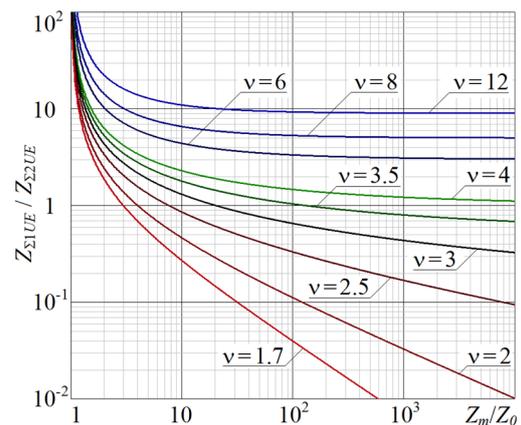


Рис. 2. Расчетные зависимости

$Z_{\Sigma UE} / Z_{\Sigma UE}$ от отношения Z_m / Z_0 для различных условий РРВ внутри здания (различных v)

Fig. 2. Dependences of $Z_{\Sigma UE} / Z_{\Sigma UE}$ on the ratio Z_m / Z_0 for different conditions of radiowave propagation inside building (different v)

Результаты анализа и их обсуждение

Для принятых моделей пространственного размещения АУ и условий РРВ между АУ и ТН, а также в предположении, что все АУ имеют ненаправленное излучение со средней ЭИИМ P_e , по известной методике [6, 7] могут быть определены следующие характеристики:

1. Плотность распределения вероятности (п.р.в.) удаленности от ТН точечных объектов «АУ», располагаемых равномерно случайно со средней плотностью ρ_e в «ближней зоне» – сферической области радиуса R_m :

$$w(R) = 3R^2 / (R_m^3), \quad 0 \leq R \leq R_m. \quad (3)$$

2. П.р.в. удаленности от ТН точечных объектов «АУ», располагаемых равномерно случайно в «дальней зоне» – сферическом кольце с параметрами R_m и R_M :

$$w(R) = 3R^2 / (R_M^3 - R_m^3), \quad R_m \leq R \leq R_M. \quad (4)$$

3. П.р.в. $w_a(Z)$ и математическое ожидание $m_{1a}(Z)$ значений ППМ Z ЭМП, создаваемых в ТН излучениями АУ ближней зоны:

$$w_a(Z) = 3Z_m^{3/2} / (2Z^{5/2}), \quad m_{1a}(Z) = 3Z_m; \quad Z \geq Z_m = P_e / (4\pi R_m^2). \quad (5)$$

Гиперболическое распределение (5) степени $-5/2$, полученное для 3D-модели случайного равномерного пространственного распределения точечных источников ЭМИ, обладает первым начальным моментом в отличие от аналогичного гиперболического распределения $w_a(Z)$ минус второй степени, характерного для 2D-модели их пространственного распределения [6, 7, 14]. Это позволяет избежать ряда ограничений и далее определять средний уровень ЭМФ как произведение среднего значения ППМ, создаваемого отдельным АУ в ТН, и среднего числа АУ в рассматриваемой области пространства.

4. Средний уровень $Z_{\Sigma 1UE}$, Вт/м², ЭМФ, образуемого в ТН излучениями АУ ближней зоны, определяется в виде скалярной суммы средних значений ППМ этих ЭМИ в ТН:

$$Z_{\Sigma 1UE} = m_{1a}(Z)N_{VS} = \rho_e P_e^{3/2} / (2\sqrt{\pi Z_m}), \quad N_{VS} = V_S \rho_e = \rho_e (P_e / Z_m)^{3/2} / (6\sqrt{\pi}), \quad (6)$$

где N_{VS} – среднее число излучающих АУ в сферической области радиуса R_m объемом V_S .

5. Для АУ, расположенных в дальней зоне, модель (1) РРВ в ТН приобретает следующий вид:

$$Z = R_m^{\nu-2} P_e / (4\pi R^\nu), \quad R_m \leq R \leq R_M. \quad (7)$$

6. П.р.в. $w_b(Z)$ ППМ ЭМП, создаваемых в ТН совокупностью АУ дальней зоны:

$$w_b(Z) = 3 / \left[\nu Z^{(3+\nu)/\nu} \left(Z_0^{-3/\nu} - Z_m^{-3/\nu} \right) \right], \quad Z_0 = R_m^{\nu-2} P_e / (4\pi R_M^\nu) \leq Z \leq Z_m. \quad (8)$$

7. Математическое ожидание $m_{1b}(Z)$ значений ППМ ЭМП, создаваемых в ТН излучениями АУ дальней зоны:

$$\left. \begin{aligned} m_{1b}(Z) &= 3Z_m^{3/\nu} Z_0^{3/\nu} \left(Z_m^{(v-3)/\nu} - Z_0^{(v-3)/\nu} \right) / \left[(v-3) \left(Z_m^{3/\nu} - Z_0^{3/\nu} \right) \right], \quad v \neq 3 \\ m_{1b}(Z) &\approx 3Z_0^{3/\nu} Z_m^{(v-3)/\nu} / (v-3), \quad v \neq 3, \quad Z_m^{3/\nu} \gg Z_0^{3/\nu}, \quad Z_m^{(v-3)/\nu} \gg Z_0^{(v-3)/\nu} \\ m_{1b}(Z) &= [Z_m Z_0 / (Z_m - Z_0)] \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3 \\ m_{1b}(Z) &\approx Z_0 \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3, \quad Z_m \gg Z_0 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

8. Средний уровень $Z_{\Sigma 2UE}$, Вт/м², составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ дальней зоны, также определяется скалярной суммой средних значений ППМ этих ЭМИ в ТН:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Sigma 2UE} &= m_{1b}(Z)N_{VSR} = \rho_e P_e^{3/2} Z_m^{(6-3\nu)/(2\nu)} \left(Z_m^{(v-3)/\nu} - Z_0^{(v-3)/\nu} \right) / \left[2(v-3)\sqrt{\pi} \right], \quad v \neq 3 \\ Z_{\Sigma 2UE} &= m_{1b}(Z)N_{VSR} = \left[\rho_e P_e^{3/2} / (6\sqrt{\pi Z_m}) \right] \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3 \\ N_{VSR} &= V_{SR} \rho_e = \rho_e P_e^{3/2} Z_m^{-3/2} \left[(Z_m / Z_0)^{3/\nu} - 1 \right] / (6\sqrt{\pi}) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где N_{VSR} – среднее число излучающих АУ в сферическом кольце дальней зоны объемом V_{SR} .

9. Суммарная средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$, Вт/м², ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ из всей сферической области их радиовидимости из ТН, определяется очевидным образом: $Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma 1UE} + Z_{\Sigma 2UE}$. Интерес представляет отношение $Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE}$, характеризующее относительный вклад излучений АУ дальней зоны в суммарный уровень ЭМФ в ТН:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &= (v-3) / \left[(Z_m / Z_0)^{(3-\nu)/\nu} - 1 \right], \quad v \neq 3 \\ Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &\approx v-3, \quad Z_m \gg Z_0, \quad v > 3 \\ Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &\approx (3-v) (Z_0 / Z_m)^{(3-\nu)/\nu}, \quad Z_m \gg Z_0, \quad v < 3 \\ Z_{\Sigma 1UE} / Z_{\Sigma 2UE} &= 3 / \ln(Z_m / Z_0), \quad v = 3 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Расчетные зависимости (11) от отношения Z_m / Z_0 для различных v приведены на рис. 2. Эти зависимости иллюстрируют наличие асимптот при $Z_m \gg Z_0$, а также позволяют примерно

оценить относительный вклад в интенсивность ЭМФ в ТН излучений АУ ближней зоны, который оказывается преобладающим только при $\nu > 4$, а при $\nu < 4$, как правило, существенно уступает вкладу излучений АУ дальней зоны.

10. На практике совокупность АУ в окрестности ТН располагается не по всему объему ближней зоны, а вблизи ее внутренней поверхности. Если все N_{VS} излучающих АУ этой области располагаются равномерно по ее внутренней поверхности на удаленности R_m от ТН, то средний уровень $Z_{\Sigma SUE}$, Вт/м², ЭМФ, создаваемого ими в ТН, определяется соотношением

$$Z_{\Sigma SUE} = N_{VS} Z_m = \rho_e P_e^{3/2} / (6\sqrt{\pi Z_m}) = Z_{\Sigma IUE} / 3 = EML_{SE} = N_{VS} P_e / (4\pi R_m^2), \quad (12)$$

где EML_{SE} – эквивалентная средняя электромагнитная нагрузка на внутреннюю сферическую границу ближней зоны, равная отношению суммарной средней мощности излучений АУ этой зоны, приходящейся на единицу площади этой границы.

11. Если излучающие АУ располагаются случайно равномерно со средней плотностью ρ_e не по всей сфере радиуса R_m и не по всему сферическому кольцу с параметрами R_m, R_M , а лишь в некотором телесном угле Ω (рис. 3), образуемом подобными стягивающими поверхностями $A_{\Omega 1}$ и $A_{\Omega 2}$ произвольной конфигурации, то соотношения (5), (6), (8), (9), (11) сохраняют силу, а средние интенсивности (6), (10) составляющих ЭМФ в ТН должны быть умножены на отношение $\Omega/4\pi$.

Это позволяет предложить общую методику определения интенсивности ЭМФ в ТН, располагаемой в помещении и в здании сложной формы, на основе аппроксимации отдельных участков внутренней поверхности S_{NZ} помещения, в котором располагается ТН (внутренней поверхности ближней зоны), и внешней поверхности здания S_{FZ} , в котором располагается это помещение (внешней поверхности дальней зоны). Эта аппроксимация осуществляется соответствующими участками внутренних и внешних сферических поверхностей, стягивающими соответствующие телесные углы $\Omega_j, j \in [1, J]$ (рис. 4).

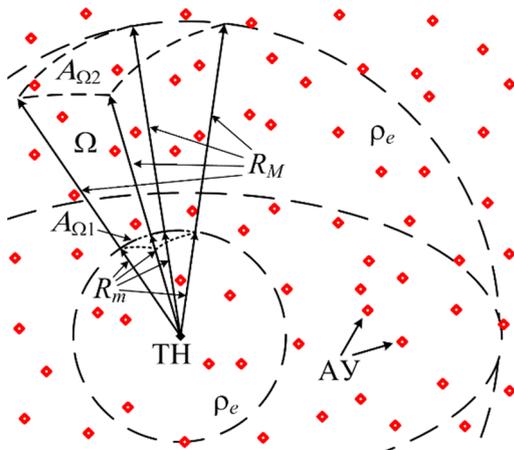


Рис. 3. Модель пространственного размещения ТН и множества АУ в телесном угле Ω , образуемом стягивающими поверхностями $A_{\Omega 1}$ на границе ближней зоны и $A_{\Omega 2}$ на границе дальней зоны

Fig. 3. Model of the spatial location of OP and the set of UE in the solid angle Ω , formed by the subtend areas $A_{\Omega 1}$ at the border of the near zone and $A_{\Omega 2}$ at the border of the far zone

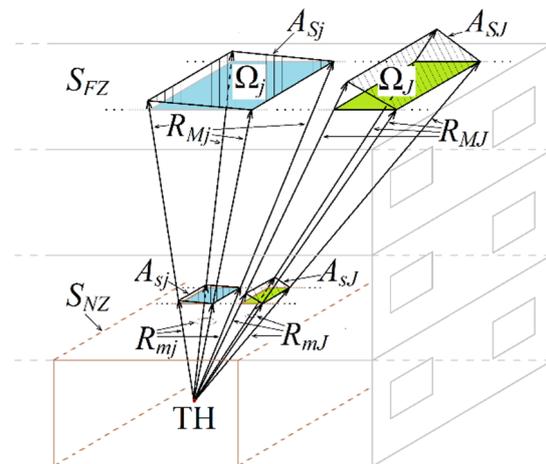


Рис. 4. Поэлементный анализ внутреннего пространства здания в отдельных телесных углах $\Omega_j, j \in [1, J]$, стягивающие поверхности которых A_{Sj}, A_{sj} аппроксимируют внешние поверхности здания и внутренние поверхности помещения соответственно

Fig. 4. Element-wise analysis of the building internal space in separate solid angles $\Omega_j, j \in [1, J]$, the subtend areas of which A_{Sj}, A_{sj} approximate the external surfaces of the building and the internal surfaces of the premises, respectively

В общем случае суммарная средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$, Вт/м², ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ, располагаемых в здании, может быть определена следующим образом:

$$Z_{\Sigma UE} = \sum_{j=1}^J Z_{\Sigma 1UEj} + \sum_{j=1}^J \Sigma_{2UEj}, \quad (13)$$

$$Z_{\Sigma 1UEj} = \rho_{e1j} P_{e1j} A_{sj} / (4\pi R_{mj});$$

$$Z_{\Sigma 2UEj} = \rho_{e2j} P_{e2j} (R_{mj} R_{mj}^{\nu_j-3} - R_{mj}^{\nu_j-2}) A_{sj} / [4\pi(\nu_j-3)R_{mj}^{\nu_j-1}], \quad \nu_j \neq 3;$$

$$Z_{\Sigma 2UEj} = A_{sj} \rho_{e2j} P_{e2j} R_{mj} \cdot \ln(R_{mj} / R_{mj}) / (4\pi R_{mj}^2) \quad \nu_j = 3,$$

где P_{e1j} , ρ_{e1j} и P_{e2j} , ρ_{e2j} – средняя ЭИИМ и средняя плотность размещения АУ в телесном угле Ω_j соответственно в пространстве ближней зоны, ограниченном стягивающей поверхностью A_{sj} , и в пространстве дальней зоны между стягивающими поверхностями A_{sj} и A_{sj} . Величины каждого из элементарных телесных углов Ω_j могут выбираться произвольно с учетом конфигурации ближней зоны и самого здания, степени равномерности пространственного распределения АУ и зависимости параметра ν условий РРВ от ориентации $\Omega_j, j \in [1, J]$.

Принимая во внимание, что модель (1) применяется для описания условий РРВ не только внутри зданий, но и вне зданий в условиях города [11], эта методика может быть использована и для оценок интенсивности ЭМФ в ТН, располагаемых вне помещений в условиях плотной многоэтажной городской застройки.

12. Для эмпирической модели (2) условий РРВ [12], уточняющей модель (1) для многоэтажных зданий и частот излучения, близких к 900 МГц, и 3D-модели пространственного размещения ТН и множества АУ внутри здания, аналогичной изображенной на рис. 1, получены следующие соотношения для суммарной средней интенсивности ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ, распределенных случайно равномерно с плотностью ρ_e , АУ/м³, по внутреннему пространству здания:

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ от $R_0 = 1$ м до $R_1 = 10$ м, для которой характерны условия РРВ в свободном пространстве ($\nu = 2$) и адекватны статистические модели (3), (5) с параметром $R_m = R_1$, средний уровень $Z_{\Sigma 1}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением, аналогичным (6):

$$Z_{\Sigma 1} = \rho_e P_e^{3/2} / (2\sqrt{\pi Z_{1m}}), \quad Z_{1m} = P_e / (4\pi R_1^2); \quad (14)$$

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ от $R_1 = 10$ м до $R_2 = 20$ м, для которой характерны условия РРВ с параметром $\nu = 3$ и адекватны статистические модели (4), (8) с параметрами $R_m = R_1$, $R_M = R_2$, средний уровень $Z_{\Sigma 2}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением:

$$Z_{\Sigma 2} = (\rho_e P_e^{3/2} \ln 8) / (6\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx \rho_e P_e^{3/2} / (3\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx 0,69 Z_{\Sigma 1}; \quad (15)$$

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ от $R_2 = 20$ м до $R_3 = 40$ м, для которой характерны условия РРВ с параметром $\nu = 6$ и адекватны модель (4) с параметрами $R_m = R_2$, $R_M = R_3$ и модель (8), средний уровень $Z_{\Sigma 3}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением:

$$Z_{\Sigma 3} = 7\rho_e P_e^{3/2} / (96\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx \rho_e P_e^{3/2} / (13,7\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx 0,22 Z_{\Sigma 2} \approx 0,15 Z_{\Sigma 1}; \quad (16)$$

– для области, ограниченной расстояниями от ТН до АУ $R \geq R_3 = 40$ м, для которой характерны условия РРВ с параметром $\nu = 12$ и адекватны модель (4) с параметром $R_m = R_3$ и параметром R_M , соответствующим удаленности от ТН границы радиовидимости АУ по уровню Z_0 , и модель (8), средний уровень $Z_{\Sigma 4}$ составляющей ЭМФ, образуемой в ТН излучениями АУ этой области, определяется соотношением

$$Z_{\Sigma 4} = \rho_e P_e^{3/2} / (192\sqrt{\pi Z_{1m}}) \approx Z_{\Sigma 3} / 14 \approx Z_{\Sigma 1} / 96, \quad R_M = 2(2R_1^{10} P_e / (\pi Z_0))^{1/12}. \quad (17)$$

Таким образом, если условия РРВ внутри здания соответствуют эмпирической модели (2) [12], то основной вклад в интенсивность ЭМФ, создаваемого излучениями всего множества АУ, распределенных случайно равномерно по внутреннему пространству многоэтажного здания, вносят излучения АУ ближней зоны, для которых условия РРВ в ТН

соответствуют условиям РРВ в свободном пространстве, а вклад ЭМИ АУ дальней зоны не превышает 3 дБ: $Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 3} + Z_{\Sigma 4} \approx 1,85Z_{\Sigma 1}$.

Заключение

1. Для известных эмпирических моделей условий РРВ в зданиях и равномерного объемного случайного распределения излучающих АУ СС по внутреннему пространству многоэтажного здания получен ряд важных соотношений, характеризующих процессы формирования электромагнитной обстановки, создаваемой в здании этими источниками ЭМИ:

– соотношения (5), (8), (9) для статистических характеристик ансамбля значений ППМ ЭМП, создаваемых в ТН излучениями АУ из различных областей внутреннего пространства здания: из ближней зоны (помещения, в котором расположена ТН) с условиями РРВ между АУ и ТН, аналогичными условиям РРВ в свободном пространстве ($\nu = 2$); и из дальней зоны (пространства здания за пределами ближней зоны), для которой наряду с более значительным затуханием радиоволн ($\nu > 2$), обусловленным необходимостью преодоления ими элементов конструкции здания, в отдельных направлениях возможно и «квазиволноводное» РРВ ($\nu < 2$) от АУ к ТН вдоль коридоров и помещений различного назначения;

– соотношения (6), (10), (14)–(17), позволяющие оценить средние уровни отдельных слагаемых ЭМФ в ТН, определяемых в виде скалярных сумм средних значений соответствующих ансамблей ППМ ЭМП в ТН, создаваемых излучениями множеств АУ как ближней зоны, так и дальней зоны в целом либо ее отдельных частей, характеризующихся различными условиями РРВ (различными ν);

– соотношения (11) для отношения интенсивностей составляющих ЭМФ ближней и дальней зон. Полученные оценки свидетельствуют о том, что при $\nu > 3$ это отношение асимптотически приближается к значению $\nu - 3$. При $\nu > 4$ вклад ЭМП АУ ближней зоны в суммарную интенсивность ЭМФ в ТН оказывается преобладающим, но при $\nu < 4$ он существенно уступает вкладу излучений АУ дальней зоны, а при $\nu < 3$ интенсивность ЭМФ в ТН практически определяется совокупностью ЭМП АУ дальней зоны.

2. Предложена методика определения интенсивности ЭМФ в помещении здания сложной формы на основе аппроксимации участков внутренней поверхности помещения, в котором располагается ТН, и внешней поверхности здания, во внутреннем пространстве которого случайно распределены излучающие АУ. Эта аппроксимация осуществляется соответствующими подобными участками внутренних и внешних сферических поверхностей, стягивающими соответствующие телесные углы, в отдельных элементах пространства которых возможны различные пространственные плотности и ЭИИМ АУ, а также различные условия РРВ. В общем случае суммарная средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями множества АУ, располагаемых в здании, определяется соотношением (13). Эта методика может быть использована и для усредненных системных оценок интенсивности ЭМФ в ТН, располагаемых как внутри, так и вне помещений, при случайном 3D-размещении множества точечных источников ЭМИ в плотной многоэтажной городской застройке как внутри, так и вне зданий, с различной пространственной плотностью и различной ЭИИМ.

3. Соотношения (6), (10), (13), (14)–(17) могут быть использованы для анализа интенсивности ЭМФ, создаваемого в многоэтажных зданиях множеством источников ЭМИ – разнообразными мобильными АУ СС 4G/5G, функционирующими в «квазинепрерывном» режиме FDD, а также стационарными пико-базовыми станциями СС, что позволяет выполнить оценки электромагнитной безопасности населения в этих зданиях, а также ЭМС этих источников ЭМИ с системами, использующими полосы частот СС на вторичной основе.

4. Для ЭМФ, образуемого в сетях 5G множеством ЭМИ АУ массовой межмашинной связи (mMTC) и представляющего собой импульсный электромагнитный случайный процесс в виде пуассоновского потока случайных импульсов [3], соотношения (5), (8) позволяют определить п.р.в. ППМ отдельных импульсов, а соотношения (6), (10), (13), (14)–(17) позволяют оценить их суммарную среднюю мощность в различных условиях. При этом данные оценки не могут непосредственно использоваться для анализа электромагнитной безопасности населения сравнением их результатов с действующим ПДУ ЭМП 10 мкВт/см², поскольку опасные уровни средней мощности импульсного электромагнитного воздействия на один-два порядка меньше

данного ПДУ, установленного для непрерывного и квазинепрерывного электромагнитного воздействия, о чем свидетельствуют принятые гигиенические нормативы [4, 5] для этих видов электромагнитных воздействий на население и аргументация [15, 16]. Принимая во внимание сложный спектрально-временной характер этих сигналов и декларирование их использования системами СС в двух-, трехдекадном частотном диапазоне (УВЧ+СВЧ+КВЧ) [1, 3], актуальным является проведение глубоких, квалифицированных и независимых исследований степени их опасности для населения с целью научного обоснования соответствующих гигиенических нормативов, позволяющих проектировать и строить безопасные сети СС 4G/5G/6G.

Список литературы / References

1. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083;2015:19.
2. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Fan P. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*, 2019;14(3):28-41.
3. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT–2020. Report ITU-R M.2412;2017:143.
4. Requirements for radio frequency electromagnetic radiation when exposed to humans. Sanitary norms and rules registered by Belarus Ministry of Health 05.03.2015; 23. (in Russ.)
5. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. SanPiN 1.2.3685–21, reg. by Russian Ministry of Justice 29.01.202; 62296. (in Russ.)
6. Mordachev V. Worst–Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2014”*, Sweden, Sept. 1–4, 2014: 1275-1280.
7. Mordachev V. System-Level Estimation of Prevailing Levels of EM Fields of Mobile Phones Considering Near–Field Zone Limitations of Their Antennas. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2017”*, Angers, France, Sept. 4–8, 2017; 6: 64.
8. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2018”*, Amsterdam, The Netherlands, Aug. 27–30, 2018: 202–207.
9. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2019”*, Barcelona, Spain, Sept. 2–6, 2019: 82-87.
10. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Rec. ITU-R P.1238–10; 2019: 26.
11. Rappaport T.S. [*Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed.*]. Prentice Hall, 2002: 710.
12. Akerberg D. Properties of a TDMA pico cellular office communication system. *IEEE Globecom*, Dec. 1988: 1343-1349.
13. ETSI TS 136 101 V14.3.0. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E–UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14).
14. Mordachev V. [*System ecology of cellular communications*]. Minsk: BSU Publishers; 2009: 319. (in Russ.)
15. Grigoriev O.A., Zubarev Y.B. [Electromagnetic Environment Management: Balance between Public Health and New Communication Technology]. *Vestnik Sviasy*. 2020;(12):20-27. (in Russ.)
16. Nikitina V. [Trends in the Development of Modern Radio Technologies. The Problem of Providing Electromagnetic Safety of The Population]. *Proc. of the Conf. “Actual Problems of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation” (BioEMF-2019)*, Moscow, Russia, Nov. 12–13, 2019: 66-69. (in Russ.)

Сведения об авторе

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник 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. +375-17-293-84-38;
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the author

Mordachev V.I., PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-84-38;
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-51-58>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.352.243+004.934.5

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕКСТА В ВИДЕ АУДИОПОТОКА

Л.В. СЕРЕБРЯНАЯ, И.Е. ЛАСЫЙ

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

Поступила в редакцию 3 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Рассмотрена задача автоматической генерации речи из текстового файла. Выполнен анализ программных средств, предназначенных для распознавания текстов и преобразования их в аудиопоток. Оценены их преимущества и недостатки, на основании чего сделан вывод об актуальности разработки программного средства автоматической генерации аудиопотока из текста на русском языке. Проанализированы модели на основе искусственных нейронных сетей, которые используются для синтеза речи, после чего построена математическая модель создаваемого программного средства. Она состоит из трех компонентов: сверточного кодировщика, сверточного декодировщика и преобразователя. Спроектирована архитектура программного средства, в которую входят графический интерфейс, сервер приложения и система синтеза речи. Разработан ряд алгоритмов: предварительной обработки текста перед загрузкой в программное средство, преобразования аудиофайлов обучающей выборки и обучения сети, генерации речи на основе произвольных текстовых файлов. Создано программное средство, представляющее собой одностраничное приложение и имеющее веб-интерфейс для взаимодействия с пользователем. Для оценки качества работы программного средства использована метрика, представляющая среднюю оценку разных мнений. В результате агрегации разных мнений метрика получила достаточно высокое значение, на основании чего можно считать, что все поставленные задачи были решены.

Ключевые слова: модель искусственной нейронной сети, аудиопоток, кодировщик и декодировщик, генерация речи, спектрограмма.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Серебряная Л.В., Ласый И.Е. Автоматическое распознавание и представление текста в виде аудиопотока. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 51-58.

AUTOMATIC RECOGNITION AND REPRESENTATION OF TEXT IN THE FORM OF AUDIO STREAM

LIYA V. SEREBRYANAYA, ILYA E. LASY

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

Submitted 3 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The problem of automatic speech generation from a text file is considered. An analytical review of the software has been completed. They are designed to recognize texts and convert them to an audio stream. The advantages and disadvantages of software products are estimated. Based on this, a conclusion was drawn about the relevance of developing a software for automatic generation of an audio stream from a text in Russian. Models based on artificial neural networks, which are used for speech synthesis, are analyzed. After that, a mathematical model of the created software is built. It consists of three components: a convolutional encoder, a convolutional decoder, and a transformer. The architecture of the software is designed. It includes a graphical interface, an application server, and a speech synthesis system. A number of algorithms have been developed: preprocessing text before loading it into a software, converting audio files of a training sample and training a network, generating speech based on arbitrary text files. A software has been created, which is a single-page application and has a web interface for interacting with the user. To assess the quality of the software, a metric was used that represents the average score of different opinions. As a result of the aggregation of different opinions, the metric received a sufficiently high value, on the basis of which it can be assumed that all the tasks have been solved.

Keywords: artificial neural network model, audio stream, encoder and decoder, speech generation, spectrogram.

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

For citation. Serebryanaya L.V., Lasy I.E. Automatic recognition and representation of text in the form of audio stream. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 51-58.

Введение

В современных условиях, когда за короткое время требуется воспринять и обработать большие объемы информации, возрастает значимость аудиоинформации. Ее восприятие может осуществляться параллельно с другими занятиями, не требует такой концентрации внимания, как чтение, снижает нагрузку на зрение, а также может выполняться слабовидящими людьми или детьми, не умеющими читать. Поэтому в последнее время возросла популярность аудиокниг и подкастов. Однако не каждый текст имеет аналог в аудиоформате. В таком случае аудиоинформацию можно получить путем генерации аудиопотока из интересующего текста [1]. Этим занимаются специальные TTS (text-to-speech)-системы, получающие на вход файлы с текстом, а выдающие – аудиофайлы. И хотя подобные системы существуют уже довольно давно, сгенерированная ими речь до сих пор уступает по качеству естественной речи.

Развитие технологий машинного и глубокого обучения, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС), позволило создать методы и алгоритмы, на основе которых синтезируются аудиопотоки, максимально приближенные к естественной речи [2, 3]. В основном это аудиоинформация на английском языке. Цель данной работы – создание программного средства (ПС), генерирующего из текстовой информации аудиопоток на русском языке.

Архитектура и принципы функционирования сверточных и рекуррентных ИНС способствовали тому, что данные сети чаще других используются в системах синтеза речи. Для оценки качества синтезируемой речи применяется метрика – средняя оценка мнений, она получается в результате статистической обработки большого числа мнений слушателей-экспертов. Эта же метрика использовалась для оценки качества передачи звука в телефонных сетях.

Анализ ПС по теме исследования, таких как Speechify, Voicedream Reader, NaturalReader, позволил оценить их преимущества и недостатки, а также сделать вывод о том, что создание программного приложения, предназначенного для автоматической генерации аудиопотока из текста, является актуальной задачей. К основным функциям создаваемого ПС можно отнести: возможность работы с текстовыми файлами в популярных форматах; синтез и воспроизведение речи на русском языке; возможность регулировать скорость и высоту генерируемого звука; возможность прерывания и возобновления прослушивания. Кроме того, значение метрики для оценки качества звука должно быть не меньше трех баллов по принятой шкале оценок.

Математическая модель программного средства

Синтез речи из текста можно рассматривать как модель «последовательность – последовательность», где в качестве входной последовательности используется текст, а в качестве выходной – спектрограмма аудиосигнала. Подобные модели состоят из двух частей: кодировщика и декодировщика. Первая из частей переводит входной сигнал в его представление в векторном виде $h=g(x)$, а вторая восстанавливает сигнал по его коду $x=f(h)$ [1].

Данная модель может быть основана на сверточных или рекуррентных ИНС, а также на их комбинациях [4]. Существенным недостатком модели «кодировщик – декодировщик» является то, что кодировщик передает на вход декодировщика только последнее состояние после этапа кодирования. Это не позволяет декодировщику анализировать более длинные зависимости внутри входной последовательности. Для устранения названного недостатка используется механизм внимания, сообщающий сети, на что необходимо обратить большее внимание. Механизм формирует матрицу весов «важности». При обучении сети «важность» становится функцией вероятности того или иного исхода в зависимости от поступивших на вход данных.

Декодировщик получает состояния со всех этапов кодировки. При этом механизм внимания назначает оценку каждому состоянию. В ходе умножения каждого состояния на преобразованную функцией *softmax* оценку определяются более и менее важные состояния. Весь процесс работы механизма внимания описывается формулой

$$A(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V, \quad (1)$$

где Q – матрица запроса; K – матрица ключей; V – матрица значений; d – взвешивающий множитель; T – длина последовательности; *softmax* – логистическая функция.

В результате механизм внимания значительно повышает производительность работы сети как во время ее обучения, так и в ходе основной работы. На рис. 1 приведена модель сети, используемая в работе.

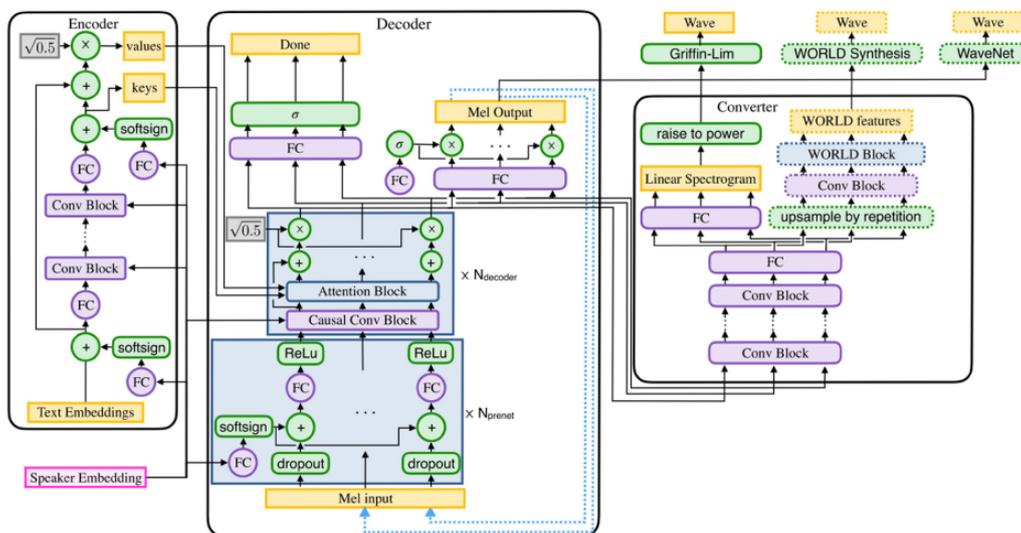


Рис. 1. Модель сети для синтеза речи
Fig. 1. Network model for speech synthesis

Модель сети состоит из трех компонентов:

- сверточного кодировщика, конвертирующего признаки текста во внутреннее векторное представление;
- сверточного декодировщика с механизмом внимания, преобразующего внутреннее представление в мел-спектрограмму;
- преобразователя, предсказывающего параметры вокодера, основываясь на состояниях декодировщика.

Кодировщик начинается со слоя вложения, который преобразует символы входного текста в векторное представление h_e . Для извлечения из текстовой информации имеющихся в ней зависимостей вложения сначала проходят через полносвязный слой, а затем через ряд сверточных блоков. Они состоят из сверточного фильтра, вентильной линейной единицы, остаточной связи с входными данными и взвешивающим множителем, равным $\sqrt{0,5}$.

На последнем шаге кодирования векторы проецируются на размерность вложений, чтобы создать векторы ключей h_k для механизма внимания. Векторы значений h_v рассчитываются на основании текстовых сложений и векторов ключей по формуле

$$h_v = \sqrt{0,5}(h_k + h_e). \quad (2)$$

Декодировщик начинается с нескольких полносвязных слоев с пороговой функцией активации, чтобы предобработать входящие мел-спектрограммы обучающей выборки. Затем следуют несколько сверточных блоков. Они генерируют запросы для передачи в блоки механизма внимания. И наконец, полносвязный слой выводит очередную группу спектрограмм, а также бинарное сообщение, указывающее на то, был ли обработан последний отрезок аудио.

Проектирование приложения

Создаваемое ПС имеет модульную структуру и состоит из трех основных компонентов: графического интерфейса, сервера приложения и системы синтеза речи (рис. 2). Для их реализации был разработан ряд алгоритмов. Рассмотрим наиболее интересные из них.

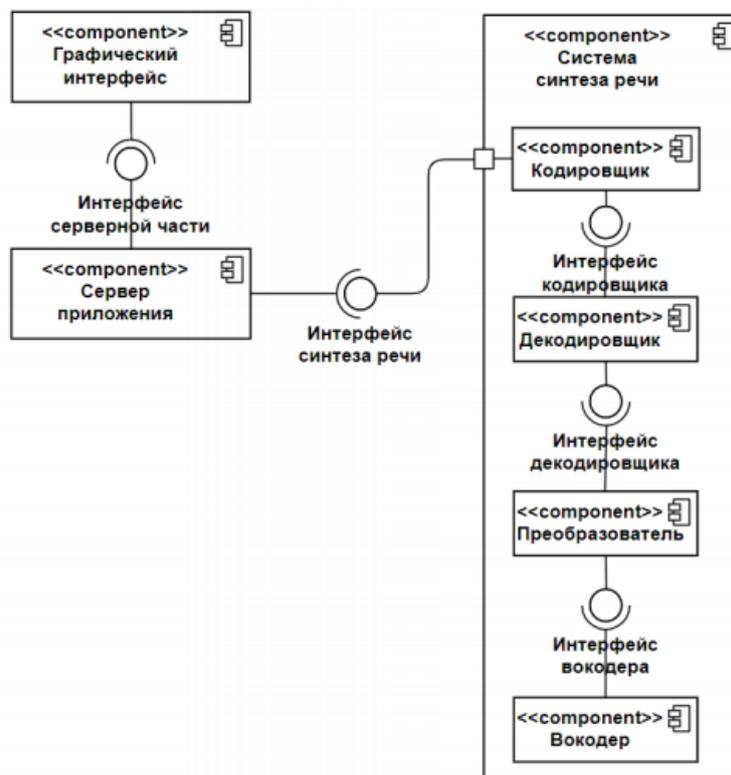


Рис. 2. Структура программного средства
Fig. 2. Software structure

Алгоритм предобработки текста необходим для предварительной обработки текста, загружаемого в ПС. На данном этапе выполняются следующие действия:

- проверка необходимости замены слов исходного текста фонемами, что может улучшить результат работы модели генерации речи;
- удаление знаков препинания, поскольку они являются непроизносимыми, и их наличие будет мешать работе модели генерации речи;
- расшифровка общеупотребляемых аббревиатур русского языка, например, «и т. д.», «т. е.», «и др.», а также замена всех специальных символов и чисел их текстовыми аналогами;
- удаление всех символов, не входящих в список разрешенных символов, остаются только буквы русского алфавита, знаки «точка» и «вопросительный знак»;
- добавление специального символа «~», обозначающего конец предложения, что необходимо модели генерации речи для создания пауз между высказываниями;
- замена всех символов их индексами в списке разрешенных символов, поскольку модель генерации речи может принимать на вход только числовые значения.

Алгоритм преобразования аудиофайлов выполняет предварительную обработку файлов обучающей выборки и содержит выполнение следующих действий:

- удаление «тишины» в начале и в конце аудиофайла, порогом «тишины» является значение, равное 15 дБ;
- при необходимости выполняется масштабирование аудиофайла, когда все значения амплитуд аудиопотока делятся на максимальное по модулю значение амплитуды аудиопотока;
- получение спектров аудиопотока и сохранение их в файл.

Для получения спектрограмм необходимо выполнить ряд действий, приведенных ниже. Сначала слабые и более высокие частоты сигнала усиливаются с целью увеличения отношения сигнала к шуму, минимизируя такие эффекты, как амплитудное искажение и клиппинг. Затем выполняется преобразование Фурье для перехода от представления аудио во временной области в частотную. При этом применяется оконная функция Хэмминга для решения проблемы «растекания спектра». Далее создается матрица мел-фильтра для перевода звука в полосу низких частот, которые лучше воспринимаются человеком. Построенная матрица перемножается со значениями исходного частотного сигнала. В результате преобразований в мел-спектрограмме содержится меньше значений, чем в исходном аудиопотоке, благодаря чему процесс обучения модели происходит быстрее. Финальным преобразованием является перевод полученных значений в децибелы для привычного описания громкости.

После того, как выполнены все подготовительные действия, можно приступить к обучению модели ИНС генерации речи. Перед запуском обучения происходит инициализация сети и, возможно, передача в нее ряда параметров: количество слоев кодировщика, коэффициент скорости обучения и т. д. В противном случае всем параметрам присваиваются значения по умолчанию. Затем в сеть загружаются предобработанные тексты из обучающей выборки и соответствующие им аудиофайлы – мел-спектрограммы.

Когда сеть обучена, она может использоваться для генерации речи на основе произвольных текстовых файлов. Работа начинается с инициализации обученной модели, затем в нее подается текст, который проходит предобработку, аналогичную текстам из обучающей выборки. Затем строится мел-спектрограмма текста, которую получает заранее обученный нейросетевой вокодер WaveNet и генерирует финальную спектрограмму. Она получается очищенной от шумов и максимально похожа на естественную речь. На завершающем этапе аудиопоток сохраняется в файл заданного формата.

Реализация программного средства

Разработанные модели и алгоритмы были положены в основу создаваемого ПС. В качестве основного языка реализации выбран Python, поэтому все последующие решения принимались исходя из этого выбора [5, 6]. В качестве каркаса ПС выбран фреймворк Python для веб-приложений – Django [7]. ПС для распознавания и преобразования текста в аудиопоток представляет собой одностраничное приложение и имеет веб-интерфейс для взаимодействия с пользователем.

Для предварительной обработки текстов использовались стандартные библиотеки, предназначенные для программирования на языке Python. Использование платформы NLTK (Natural Language Toolkit) позволило выполнить необходимую обработку текстов. С помощью библиотек NumPy, SciPy, librosa, lws выполнялась обработка аудиофайлов: построение спектрограмм, мел-спектрограмм, преобразования Фурье, перевод из амплитудных значений в децибелы и др.

Для работы с ИНС была выбрана библиотека глубокого обучения Tensorflow, не ограничивающая сложность сети [8, 9]. Для тренировки сети использовалась совокупность аудиокниг на русском языке. Исходные записи разбивались на временные отрезки от 1 до 10 с, суммарная длительность которых составляет приблизительно 20 ч.

В качестве функции потерь для обучения модели выбрана маскированная сумма средней абсолютной ошибки мел-спектрограмм, генерируемых декодировщиком, и средней абсолютной ошибки спектрограмм, генерируемых преобразователем. Наличие маски позволяет исключить данные с нулевыми значениями из расчетов функции потерь.

Результаты и их обсуждение

Для оценки результатов работы созданного ПС, выполняющего перевод текста в речь, была использована средняя оценка мнений группы людей. Им предоставлялись тексты, а также аудиозаписи, сгенерированные по ним. Каждому человеку предлагалось оценить по пятибалльной шкале качество аудиопотока. В результате агрегации полученных значений метрика оказалась равной 3,8. Таким образом, ПС имеет достаточно высокий показатель оценки, на основании чего можно считать, что все поставленные задачи успешно решены.

В ПС реализован ряд функций для синтеза речи на основе текста. Существует возможность ввода текста как с клавиатуры, так и из текстового файла. Имеется поддержка интерфейса для слабовидящих людей.

По завершении ввода текста через непродолжительное время начинается его воспроизведение. Текущее предложение выделено в окне текста, что показано на рис. 3. Во время воспроизведения аудио можно останавливать процесс, перемещаться по тексту, выбирая интересующее предложение. Предложенный подход с небольшими изменениями может быть реализован не только для русского языка, но и для других языков.

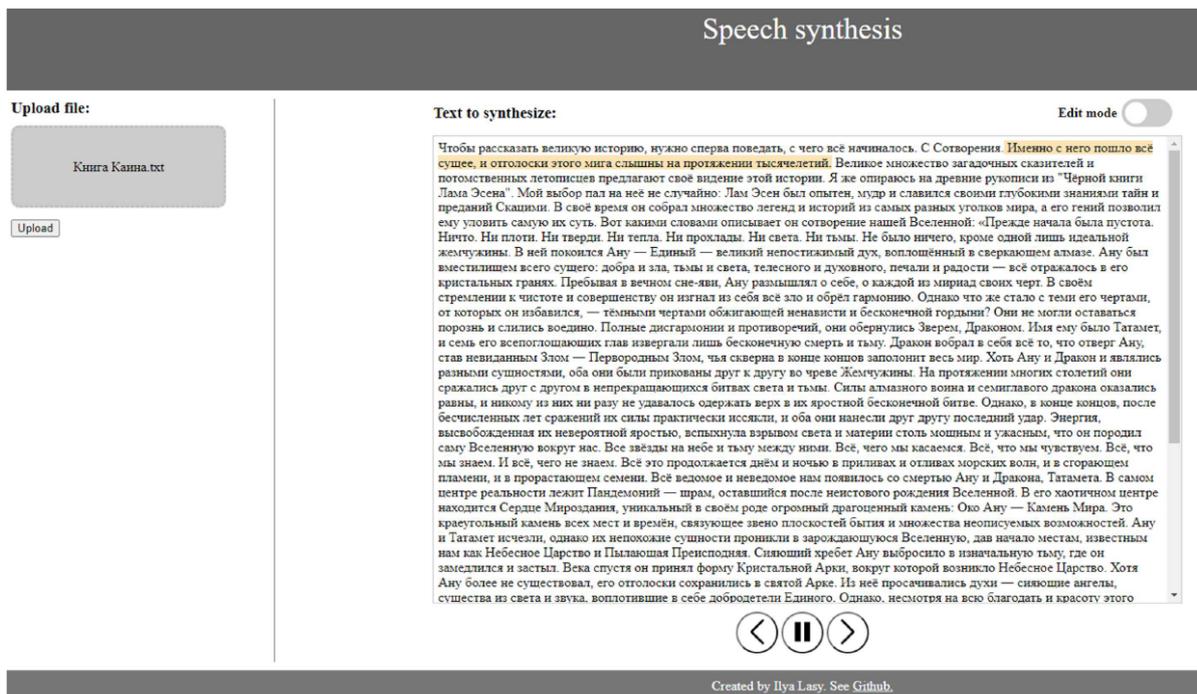


Рис. 3. Окно работы программного средства
Fig 3. Software window

Заключение

В ходе работы были исследованы различные подходы к решению задачи представления текста в виде аудиопотока. Анализ программных продуктов по теме исследования, а также методов, положенных в их основу, показал, что наиболее удачной моделью для преобразования текста в речь является искусственная нейронная сеть.

Была построена математическая модель для распознавания текста и генерации аудиопотока. На ее основе спроектирована архитектура ПС, разработан ряд алгоритмов и программных модулей. Тестирование ПС показало, что оно реализует все необходимые функции. Оценка качества сгенерированного аудиопотока приближает его к уровню естественной речи. Намечены дальнейшие пути развития созданного ПС и расширения его функциональных возможностей.

Список литературы

1. Гольдберг Й. *Нейросетевые методы в обработке естественного языка*. Москва: ДМК-Пресс; 2019.
2. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. *Глубокое обучение = Deep Learning*. Москва: ДМК-Пресс; 2017.
3. Николенко С.И., Кадуринов А.А., Архангельская Е.О. *Глубокое обучение*. Санкт-Петербург: Питер; 2018.
4. Траск Э. *Грокаем глубокое обучение*. Санкт-Петербург: Питер; 2019.
5. Шолле Ф. *Глубокое обучение на Python*. Санкт-Петербург: Питер; 2018.
6. Элбон К. *Машинное обучение на Python. Сборник рецептов*. Санкт-Петербург: BHV; 2019.
7. Меле А. *Django 2 в примерах*. Москва: ДМК-Пресс; 2019.
8. Реза Б.З., Рамсундар Б. *TensorFlow для глубокого обучения*. Санкт-Петербург: BHV; 2019.
9. Ганегедара Т. *Обработка естественного языка с TensorFlow*. Москва: ДМК-Пресс; 2019.

References

1. Goldberg J. [Neural network methods in natural language processing]. Moscow: DMK-Press; 2019. (In Russ)
2. Gudfellow Ya., Bendzhio I., Kurvill' A. [Glubokoye obucheniye = Deep Learning]. Moscow: DMK-Press; 2017. (In Russ)
3. Nikolenko S.I., Kadurin A.A., Arkhangel'skaya Ye.O. [Deep Learning]. St. Petersburg: Piter; 2018. (In Russ)
4. Trask E. [Grokay deep learning]. St. Petersburg: Piter; 2019. (In Russ)
5. Scholle F. [Deep Learning in Python]. St. Petersburg: Piter; 2018. (In Russ)
6. Elbon K. [Machine learning in Python. Collection of recipes]. St. Petersburg: BHV; 2019. (In Russ)
7. Mele A. [Django 2 in examples]. Moscow: DMK-Press; 2019. (In Russ)
8. Reza BZ, Ramsundar B. [TensorFlow for deep learning]. St. Petersburg: BHV; 2019. (In Russ)
9. Ganegedara T. [Natural Language Processing with TensorFlow]. Moscow: DMK-Press; 2019. (In Russ)

Вклад авторов

Серебряная Л.В. сформулировала задачи, которые необходимо было решить в ходе исследований, разработала математическую модель, а также выполняла анализ и интерпретацию полученных результатов.

Ласый И.Е. разработал архитектуру и алгоритмы программного средства автоматического синтеза речи на основе текста, выполнил экспериментальную проверку полученных результатов.

Authors' contribution

Serebryanaya L.V. identified the tasks that needed to be solved during the research, developed a mathematical model and performed analysis and interpretation of the results obtained.

Lasy I.E. developed the architecture and algorithms of a software for automatic speech synthesis based on text, carried out an experimental verification of the results.

Сведения об авторах

Серебряная Л.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ласый И.Е., выпускник 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. +375-17-293-84-93;
e-mail: L_silver@mail.ru
Серебряная Лия Валентиновна

Information about the authors

Serebryanaya L.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Information Technologies Software Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lasy I.E., Graduate of the Information Technologies Software Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-84-93;
e-mail: L_silver@mail.ru
Serebryanaya Liya Valentinovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-59-65>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ ШОТТКИ С МОП-КАНАВКАМИ

Я.А. СОЛОВЬЁВ

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

Поступила в редакцию 4 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Настоящая работа посвящена разработке математической модели прямой ветви вольт-амперной характеристики диодов Шоттки с канавочной структурой металл – окисел – полупроводник (МОП), учитывающей аккумуляцию основных носителей в кремнии около стенок канавок при прямом смещении. Предложенная математическая модель учитывает снижение последовательного сопротивления области дрейфа диода Шоттки при увеличении напряжения на выпрямляющем контакте за счет обогащения электронами кремния около стенок канавок. Проведено сравнение предложенной модели с экспериментальными результатами для диодов Шоттки с канавочной структурой металл – окисел – полупроводник с номинальным обратным напряжением 45,0 В и номинальным прямым током 50,0 А. Показано, что погрешность расчета величины прямого напряжения для новой модели не превышает 1,2 % в диапазоне прямых токов от 20,0 до 50,0 А, что в 4,6–9,7 раз меньше погрешности расчета для классической модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке структуры и топологии диодов Шоттки с канавочной структурой металл – окисел – полупроводник с заданными электрическими параметрами.

Ключевые слова: диод Шоттки, МОП-канавочная структура, вольт-амперная характеристика, моделирование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводились в рамках проекта ГПНИ (№ ГР 20191100). Автор признателен В.А. Пилипенко, А.Н. Петлицкому, О.Э. Сарычеву за помощь при проведении эксперимента и обсуждении полученных результатов.

Для цитирования. Соловьёв Я.А. Моделирование прямой ветви вольт-амперных характеристик диодов Шоттки с МОП-канавками. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 59-65.

SIMULATION OF FORWARD CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS FOR SCHOTTKY DIODES WITH MOS TRENCHES

JAROSLAV A. SOLOVJOV

JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" holding managing company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 4 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Present work is devoted to the development of a mathematical model for the forward current-voltage characteristic of Schottky diodes with a metal – oxide – semiconductor (MOS) trench structure, which takes into account the accumulation of the main carriers in silicon near the walls of the trenches at a forward bias. The proposed model considers the decrease of the series resistance of the Schottky diode drift region with an increase in the voltage at the rectifying contact due to the enrichment of silicon with electrons near the walls of the trenches. The proposed model is compared with the experimental results for Schottky diodes with a metal – oxide – semiconductor trench structure with a nominal reverse voltage of 45.0 V and a nominal forward current of 50.0 A. It is shown that the error in calculating the direct voltage value for the new model does not exceed 1.2 % in the range of direct currents from 20.0 to 50.0 A, which is 4.6–9.7 times less than the calculation error for the classical model. The results obtained can be used to develop the structure and geometry of Schottky diodes with a metal – oxide – semiconductor trench structure with required electrical parameters.

Keywords: Schottky diode, trench MOS structure, current voltage characteristic, simulation.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

Gratitude. Studies carried out within the framework of SARP project (SR №20191100). Author is grateful to V.A. Pilipenko, A.N. Petlitsky, O.E. Sarychev for assistance in performing the experiment and the result discussion.

For citation. Solovjov J.A. Simulation of forward current-voltage characteristics for Schottky diodes with MOS trenches. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 59-65.

Введение

Диоды Шоттки широко используются в силовой электронике в качестве выпрямителей тока в схемах управления электропитанием, где по сравнению с традиционными диодами на основе $p-n$ -переходов они характеризуются меньшим падением прямого напряжения при одинаковой плотности тока и лучшим быстродействием, обусловленным отсутствием неосновных носителей [1]. Диод Шоттки с МОП (металл – окисел – полупроводник) канавками представляет собой полупроводниковый прибор на основе выпрямляющего контакта металл – полупроводник, у которого под металлизацией анода расположена совокупность целевидных канавок, представляющих собой МОП-структуру, затвор которой электрически соединен с металлизацией анода [2]. В настоящее время диоды Шоттки с МОП-канавками являются одними из наиболее востребованных на рынке электронной компонентной базы силовой электроники, поскольку обеспечивают наилучшее сочетание между требованиями к электрическим параметрам при прямом и обратном включении [3, 4].

В отличие от классической структуры силового диода Шоттки с охранным кольцом электрические параметры диодов Шоттки с МОП-канавками определяются не только контактно-барьерными свойствами металлизации анода, но и конструктивно-топологическими параметрами структуры, что усложняет поиск оптимальных решений при создании структур тренч-МОП диодов Шоттки с заданными электрическими параметрами [5]. Классическая математическая модель прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) диодов Шоттки с МОП-канавками не является достаточно точной, поскольку не учитывает аккумуляцию основных носителей в кремнии вдоль стенок канавок при прямом смещении, а проведение более точных расчетов

требует специализированное программное обеспечение для приборно-технологического моделирования [6].

Целью данной работы является разработка математической модели прямой ветви ВАХ диодов Шоттки с МОП-канавками, учитывающей аккумуляцию основных носителей в кремнии около стенок канавок при прямом смещении.

Постановка задачи

Поскольку диод Шоттки с МОП-канавками представляет собой периодическую структуру, то моделирование его ВАХ проводят в приближении одномерной модели для фрагмента структуры, содержащего один период единичной длины [6] (рис. 1, а). В предлагаемой модели учитывается формирование в кремнии области аккумуляции вдоль границы SiO₂/Si МОП-канавок за счет прикладываемого к слою поликристаллического кремния (ПКК) положительного потенциала при прямом смещении.

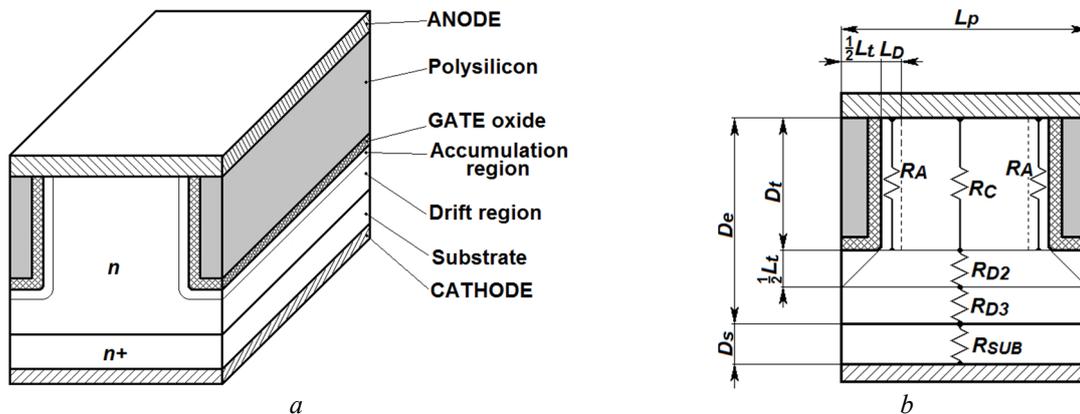


Рис. 1. Диод Шоттки с МОП-канавками при прямом смещении:
а – фрагмент периодической структуры; б – одномерная модель
Fig. 1. Trench MOS Schottky diode under forward bias condition:
а – fragment of the regular structure; б – one dimensional model

Классический подход к моделированию прямой ветви ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками заключается в рассмотрении суммы двух составляющих прямого напряжения [7]:

$$V_F(I_F) = V_{SD}(I_F) + I_F R_{SER}, \quad (1)$$

где V_F – приложенное к структуре диода прямое напряжение, В; I_F – протекающий через структуру прямой ток, А; V_{SD} – напряжение, прикладываемое непосредственно к выпрямляющему контакту, В; R_{SER} – последовательное сопротивление диодной структуры, Ом, приводящее к дополнительному падению напряжения V_{SER} , В.

В свою очередь, величина R_{SER} определяется суммой (рис. 1, б) [7]

$$R_{SER} = R_{D1} + R_{D2} + R_{D3} + R_{SUB}, \quad (2)$$

где R_{D1} – сопротивление области дрейфа между канавками, Ом; R_{D2} – сопротивление участков области дрейфа при переходе от пространства между канавками к сплошному слою, Ом; R_{D3} – сопротивления сплошного слоя области дрейфа, граничащего с подложкой, Ом; R_{SUB} – сопротивление подложки, Ом.

При формировании в кремнии области аккумуляции вдоль стенок канавок формируются участки с меньшим, чем в остальной части области дрейфа, удельным сопротивлением R_A (Ом) (рис. 1, б), которые шунтируют сопротивление R_{D1} и уменьшают в целом величину R_{SER} . Для учета данного факта в математической модели прямой ветви ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками целесообразно в качестве аргумента функции использовать параметр V_{SD} , для чего выражение (1) приведем к следующему виду:

$$V_F(V_{SD}) = V_{SD} + I_F(V_{SD}) R_{SER}(V_{SD}). \quad (3)$$

Таким образом, для построения математической модели прямой ветви ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками, учитывающей формирование в кремнии областей аккумуляции вдоль стенок канавок, необходимо решить следующие задачи по установлению зависимостей:

- концентрации основных носителей в области аккумуляции от приложенного к выпрямляющему контакту напряжения V_{SD} ;
- прямого тока I_F от приложенного к выпрямляющему контакту напряжения V_{SD} ;
- последовательного сопротивления R_{SER} от приложенного к выпрямляющему контакту напряжения V_{SD} .

Построение математической модели

1. *Зависимость концентрации основных носителей в области аккумуляции.* Известно, что глубина области аккумуляции равна длине Дебая в полупроводнике, численное значение которой определяется из выражения [8]

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s\epsilon_0}{N_D q^2}}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹; T – абсолютная температура, К; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость кремния, равная 11,9; ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф·см⁻¹; N_D – концентрация доноров в области дрейфа; q – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Дополнительная концентрация носителей в области аккумуляции (см⁻³) определяется выражением [8]

$$\Delta n = \sqrt{2} N_D \left(e^{\frac{q\psi_s}{2kT}} - 1 \right), \quad (5)$$

где ψ_s – поверхностный потенциал на границе SiO₂/Si, В. Его величина, в свою очередь, зависит от приложенного к МОП-структуре ПМК/SiO₂/Si напряжения, которое будем считать численно равным напряжению, приложенному к выпрямляющему контакту металл – кремний V_{SD} , В.

Зависимость параметра ψ_s от величины V_{SD} можно установить из следующих рассуждений. Приложенное к МОП-структуре напряжение распределяется между слоем SiO₂ и областью аккумуляции в соответствии с выражением [8]

$$V_{SD} = V_{OX} + \psi_s = E_{OX} d_{OX} + \frac{1}{2} E_{Si} L_D, \quad (6)$$

где V_{OX} – напряжение, приложенное к слою SiO₂, В; E_{OX} – напряженность электрического поля в слое SiO₂, В; d_{OX} – толщина слоя SiO₂, см; E_{Si} – напряженность электрического поля на границе SiO₂/Si, В·см⁻¹. С другой стороны, в соответствии с законом Гаусса напряженности электрических полей в слое SiO₂ и на границе SiO₂/Si соотносятся пропорционально диэлектрическим постоянным SiO₂ и кремния [7]:

$$E_{OX} = \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{OX}} E_{Si}, \quad (7)$$

где ϵ_{OX} – диэлектрическая проницаемость SiO₂, равная 3,89.

Подстановка выражения (7) в выражение (6) с последующим его решением относительно ψ_s дает следующий результат:

$$\psi_s = \frac{V_{SD} L_D}{2 \left(1 + \frac{\epsilon_{Si} d_{OX}}{\epsilon_{OX}} \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, концентрация носителей N_{Da} , (см⁻³) в области аккумуляции будет определяться как сумма концентрации доноров в области дрейфа и дополнительной концентрации носителей с учетом выражений (5) и (8):

$$N_{Da} = N_D \left(1 + \sqrt{2} \left(e^{\frac{qV_{SD}}{4kT \left(1 + \frac{\epsilon_S d_{OX}}{\epsilon_{OX}} \right)}} - 1 \right) \right). \quad (9)$$

2. *Зависимость прямого тока от напряжения на выпрямляющем контакте.* Величину прямого тока, протекающего через диодную структуру, определяли из выражения для ВАХ при прямом смещении [8]:

$$I_F = \frac{S_K (L_p - L_t)}{L_p} A T^2 e^{\left(\frac{q(V_{SD} - \phi_B)}{kT} \right)}, \quad (10)$$

где S_K – площадь контакта металлизации анода в структуре диода Шоттки с МОП-канавками, см²; L_p – ширина шага диодной структуры, см; L_t – ширина МОП-канавки, см; A – эффективная постоянная Ричардсона, равная 112 А·см⁻²; ϕ_B – высота барьера Шоттки контакта металл – кремний, В.

3. *Зависимость последовательного сопротивления.* Для упрощения расчета составляющих величины последовательного сопротивления R_{D1} , R_{D2} , R_{D3} и R_{SUB} воспользуемся одномерной моделью для одного периода структуры единичной длины (рис. 1, а, б). В таком случае вклад в удельное сопротивление одной ячейки области дрейфа между соседними канавками R_{D1}^* (Ом·см) будет определяться сопротивлением центральной области R_C и сопротивлением двух областей аккумуляции R_A (рис. 1, б):

$$R_{D1}^* = \frac{D_t}{q\mu \left[N_D (L_p - L_t - 2L_D) + 2N_{Da} L_D \right]}, \quad (11)$$

где D_t – глубина МОП-канавки, см; μ – подвижность электронов в кремнии, равная 1500 см²·В⁻¹·с⁻¹.

Вклад в удельное сопротивление ячейки области дрейфа при переходе от пространства между канавками к сплошному слою R_{D2}^* (Ом·см) (рис. 1, б) определяется выражением [7]

$$R_{D2}^* = \frac{1}{2q\mu N_D} \ln \left(\frac{L_p}{L_p - L_t} \right). \quad (12)$$

Вклад в удельное сопротивление сплошного слоя области дрейфа, граничащего с подложкой R_{D3}^* (Ом·см) (рис. 1, б) определяется выражением [7]

$$R_{D3}^* = \frac{D_e - D_t - \frac{1}{2} L_t}{q\mu N_D L_p}, \quad (13)$$

где D_e – полная толщина области дрейфа, см.

И, наконец, для вклада в удельное сопротивление ячейки сопротивления подложки R_{SUB}^* (Ом·см) (рис. 1, б) справедливо выражение

$$R_{SUB}^* = \rho_{SUB} \frac{D_S}{L_p}, \quad (14)$$

где ρ_{SUB} – удельное сопротивление кремниевой подложки, Ом·см; D_S – толщина кремниевой подложки, см.

Таким образом, величина последовательного сопротивления области диода Шоттки с МОП-канавками будет определяться следующим выражением:

$$R_{SER} = \frac{L_p}{S_K} (R_{D1}^* + R_{D2}^* + R_{D3}^* + R_{SUB}^*). \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

Расчеты прямой ВАХ согласно предложенной и классической модели проводили для диодов Шоттки с МОП-канавками (рис. 2) с номинальным обратным напряжением 45 В и номинальным прямым током 50 А. Параметры структуры, использованные для расчета, приведены в табл. 1.

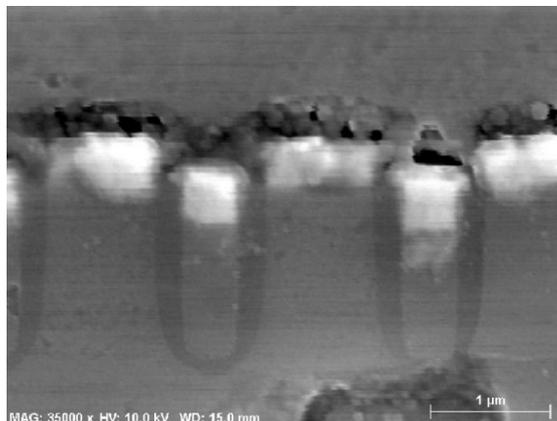


Рис. 2. РЭМ фото фрагмента структуры диода Шоттки с МОП-канавками
Fig. 2. SEM image of trench MOS Schottky diode structure fragment

Таблица 1. Параметры структуры диода Шоттки с МОП-канавками
Table 1. Structure parameters of trench MOS Schottky diode

Параметр Parameter	N_D	φ_B	d_{OX}	S_K	L_P	L_t	D_t	D_e	D_s	ρ_s	α
Единица Unit	Cm^{-3} Cm^{-3}	В V	см cm	cm^2 cm^2	см cm	см cm	см cm	см cm	см cm	Ом·см Ohm·cm	см cm
Значение Value	$1,1 \cdot 10^{16}$	0,687	$1,8 \cdot 10^5$	$9,6 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$

Сравнительный анализ результатов моделирования (рис. 3) показывает, что при величине прямого тока вплоть до 5,0 А обе модели предсказывают величину прямого тока с погрешностью менее 1,0 %. В диапазоне прямых токов от 5,0 до 50,0 А погрешность расчета прямого напряжения для классической модели возрастает до 8,8 %. В то же время для предложенной модели, учитывающей снижение последовательного сопротивления при увеличении напряжения на выпрямляющем контакте за счет аккумуляции электронов в кремнии вдоль стенок канавок, погрешность расчета не превышает 1,2 %. Причем при величине прямого тока от 25,0 до 50,0 А точность новой модели вырастает в 4,6–9,7 раз, что сопоставимо с результатами приборно-технологического моделирования [6].

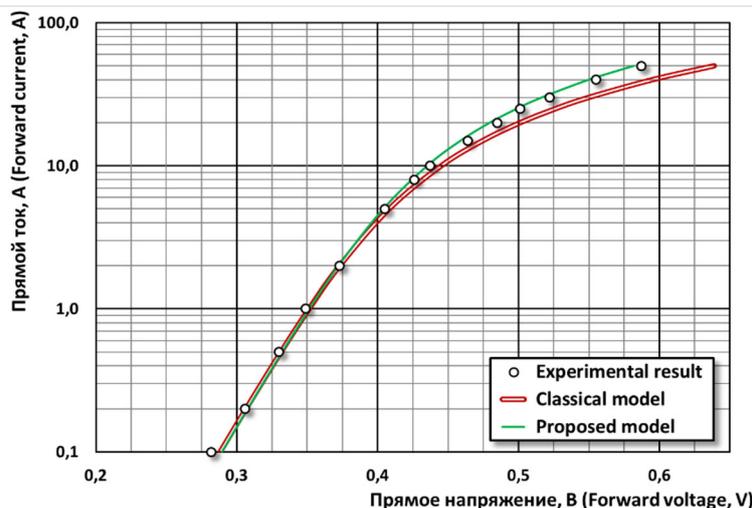


Рис. 3. Результаты моделирования прямой ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками
Fig. 3. Simulation result of forward current-voltage characteristics for trench MOS Schottky diode

Заключение

Предложена математическая модель прямой ветви вольт-амперной характеристики диода Шоттки с МОП-канавками, которая учитывает снижение последовательного сопротивления области дрейфа при увеличении напряжения на выпрямляющем контакте за счет аккумуляции электронов кремнии вдоль стенок канавок. Проведено сравнение предложенной модели с экспериментальными результатами для диодов Шоттки с МОП-канавками с номинальным обратным напряжением 45,0 В и номинальным прямым током 50,0 А. Показано, что погрешность расчета величины прямого напряжения для новой модели не превышает 1,2 %, что в диапазоне прямых токов от 20,0 до 50,0 А в 4,6–9,7 раз меньше погрешности классической модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке структуры и топологии диодов Шоттки с МОП-канавками с заданными электрическими параметрами.

Список литературы

1. Белоус А.И., Солодуха В.А., Ефименко С.А., Пилипенко В.А. *Основы силовой электроники*. Москва: Техносфера; 2019.
2. Baliga B.J. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science+Business Media; 2008.
3. Голубев Н., Токарев В., Шпаковский С. Применение субмикронной технологии – путь к созданию высокоэффективных диодов Шоттки. *Силовая электроника*. 2005;4:4-7.
4. Ланин В., Соловьёв Я., Керенцев А. Конструктивно-технологическая оптимизация параметров диодов Шоттки. *Силовая электроника*. 2011; 1: 12–17.
5. Котов В.С., Голубев Н.Ф., Борисенко В.Е. Конструктивно-технологическое усовершенствование диодов Шоттки с МОП канавочной структурой. *Доклады БГУИР*. 2013;5(75):12-16.
6. Котов В.С., Голубев Н.Ф., Токарев В.В., Борисенко В.Е. Моделирование диодов Шоттки с МОП канавочной структурой. *Практическая силовая электроника*. 2013;3(51):48-53.
7. Baliga B.J. *Advanced power rectifier concepts*. Springer Science+Business Media; 2009.
8. Зи С.М. *Физика полупроводниковых приборов*. Москва: Мир; 1984.

References

1. Belous A.I., Solodukha V.A., Efimenko S.A., Pilipenko V.A. [*Fundamentals of power electronics*]. Moscow: Technosphera; 2019. (In Russ.)
2. Baliga B.J. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science+Business Media; 2008.
3. Golubev N., Tokarev V., Shpakovsky S. [Application of submicron technology – the way to create high-performance Schottky diodes]. *Silovaya elektronika = Power electronics*. 2005;4:4-7. (In Russ.)
4. Lanin V., Solovjov J., Kerentsev A. [Structure and technological optimization of Schottky diodes parameters]. *Power electronics*. 2011; 1: 12–17. (In Russ.)
5. Kotov V.S., Golubev N.F., Borisenko V.E. [Structure and technological improvements of TMBS diodes]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2013;5(75):12-16. (In Russ.)
6. Kotov V.S., Golubev N.F., Tokarev V.V., Borisenko V.E. [Trench MOS barrier Schottky diode simulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical power electronics*. 2013; 3(51): 48-53. (In Russ.)
7. Baliga B.J. *Advanced power rectifier concepts*. Springer Science+Business Media; 2009.
8. Sze S.M. [*Physics of semiconductor devices*]. Moscow: Mir; 1984. (In Russ.)

Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора Филиала «Транзистор», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Information about the authors

Solovjov J.A., Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch, JSC “INTEGRAL” – “Integral” holding managing company.

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Корженевского, 16,
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ»
тел. +375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL”
tel. +375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-66-73>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 533.9.072

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО, А.Л. БАРАХОЕВ, О.И. ТИХОН, А.А. МОЙСЕЕВ

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

Поступила в редакцию 27 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Разработан исследовательский стенд для микроплазменной обработки поверхностей объектов с возможностью перемещения зоны разряда вдоль объекта с использованием программно управляемого линейного шагового двигателя. Конструкция стенда позволяет применять разные типы систем плазмообразования, а также проводить обработку с подачей в зону разряда различных газов, таких как воздух, азот, кислород и т. д. Исследовательский стенд оснащен измерительным оборудованием для контроля электрических и физических характеристик разряда (цифровые осциллографы, оптический эмиссионный спектрометр, аэроиономер и др.). Для последующей оценки качества и характеристик обработанных поверхностей могут использоваться микротвердомер, гониометр, интерференционный микроскоп, трибометр, разрывная машина и т. д. Приведены примеры электрических характеристик разрядных устройств, апробированных в составе исследовательского стенда, оптической эмиссионной спектроскопии плазмы, результатов измерений краевого угла смачивания поверхностей обработанных объектов.

Ключевые слова: исследовательский стенд, плазменная обработка поверхности, плазма атмосферного давления.

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Барахоев А.Л., Тихон О.И., Моисеев А.А. Исследовательский стенд для микроплазменной поверхностной обработки материалов в условиях атмосферного давления. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 66-73.

RESEARCH STAND FOR MICROPLASMA SURFACE TREATMENT OF MATERIALS AT ATMOSPHERIC PRESSURE

SIARHEI V. BORDUSAU, SIARHEI I. MADVEIKA, ANDREI L. BARAKHOYEYU,
OLEG I. TSIKHAN, ANDREI A. MAISEYEU

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

Submitted 27 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A research stand for microplasma treatment of object surfaces with the ability to move the discharge zone along the object using a program-controlled linear stepper motor has been developed. The design of the stand allows the use of different types of plasma generation systems, as well as processing with feeding of various gases such as air, nitrogen, oxygen, etc. into the discharge zone. The research bench is equipped with measuring equipment for monitoring the electrical and physical characteristics of the discharge (digital oscilloscopes, optical emission spectrometer, air ion meter, etc.). A microhardness tester, goniometer, interference microscope, tribometer, tensile testing machine, etc. can be used to further evaluate the quality and characteristics of the treated surfaces. Examples of the electrical characteristics of discharge devices tested as part of the research stand, optical emission spectroscopy of plasma, and results of measurements of the contact angle of treated objects surfaces are given.

Keywords: research stand, plasma surface treatment, atmospheric pressure plasma.

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

For citation. Bordusau S.V., Madveika S.I., Barakhoyeu A.L., Tsikhan O.I., Maisseyeu A.A. Research stand for microplasma surface treatment of materials at atmospheric pressure. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 66-73.

Введение

Обработка материалов при атмосферном давлении обладает определенными преимуществами по сравнению с традиционной вакуумной плазменной обработкой: помимо снижения затрат на оборудование и устранения ограничений, налагаемых совместимостью с вакуумом, плазменные процессы при высоком давлении и низкой температуре обеспечивают эффективную генерацию активных химических частиц, высокую химическую селективность, минимальную энергию ионов, что приводит к малому повреждению поверхности, недостижимому другими способами обработки [1–3]. Проблемой является распространение зоны воздействия разряда на всю площадь обрабатываемой поверхности. Для этого могут использоваться системы с перемещением разряда над поверхностью обрабатываемого объекта либо системы с перемещением обрабатываемого объекта [4–6]. Для контроля за протеканием процесса плазмообразования и поддержания разряда могут использоваться различные методы, такие как зондовые, спектроскопические, масс-спектрометрические и т. д. [6–8]. Одновременное измерение нескольких характеристик разряда, например, электрических и оптических, позволяет эффективно контролировать концентрацию и состав продуктов плазмохимических реакций, что делает возможным проведение обработки в нескольких режимах, предпочтительных для того или иного обрабатываемого материала [9, 10].

Большое разнообразие типов разрядов атмосферного давления, которые могут применяться для решения широкого круга задач модификации состояния и свойств поверхностей объектов плазменной обработки, требует экспериментальной апробации и оптимизации режимов работы как разрядных систем, так и отдельных стадий процессов управляемого плазменного воздействия на материалы. При этом особое значение имеет регистрация и документирование как можно большего набора параметров процессов обработки и выявление закономерностей их влияния на целевые характеристики объектов.

Для решения такого рода задач разработан исследовательский стенд, краткое описание которого и примеры практического использования приведены ниже.

Состав исследовательского стенда

Исследовательский стенд, структурная схема которого показана на рис. 1, состоит из системы плазмообразования и программно управляемого линейного шагового двигателя для перемещения разрядного устройства вдоль поверхности обрабатываемого объекта. В качестве плазмообразующей системы могут использоваться разрядные устройства разных типов. К примеру, это может быть устройство для возбуждения барьерного диэлектрического разряда, устройство для возбуждения искрового импульсного разряда, в котором газовый поток через зону разряда формируется при помощи мембранного компрессора и др. Для интенсификации процесса обработки за счет нагрева обрабатываемого объекта в стенде предусмотрен керамический нагреватель со встроенным термоэлектрическим преобразователем для контроля и управления температурными режимами объекта обработки. Управление шаговым двигателем осуществляется при помощи компьютера. Каретка шагового двигателя может быть запрограммирована к возвратно-поступательному перемещению равномерно со скоростью от 5 до 1000 мм/с, а также циклически ступенчато (когда скорость перемещения на разных участках траектории движения различна). Контроль электрических режимов разрядных систем осуществляется при помощи делителя напряжения 1:1000 и цифрового осциллографа С8-46/3. Контроль и регистрация оптических характеристик газового разряда производится фотоэлектронным умножителем, сигналы с которого подаются на цифровой осциллограф. Регистрация оптического эмиссионного спектра плазмы разряда может осуществляться малогабаритным спектрометром SL 40-2-1024. Для измерения концентрации газообразных заряженных частиц может быть использован аэроиономер АИМ-1. Фрагмент общего вид стенда показан на рис. 2.

Для оценки влияния плазмы атмосферного давления на качество и характеристики обработанных поверхностей в зависимости от целевого назначения могут использоваться гониометр ЛК-1, микротвердометр Leica VMHT MOD, интерференционный микроскоп МИИ-4У4.2, трибомер МТ-4, разрывная машина STC-500kg и т. д.

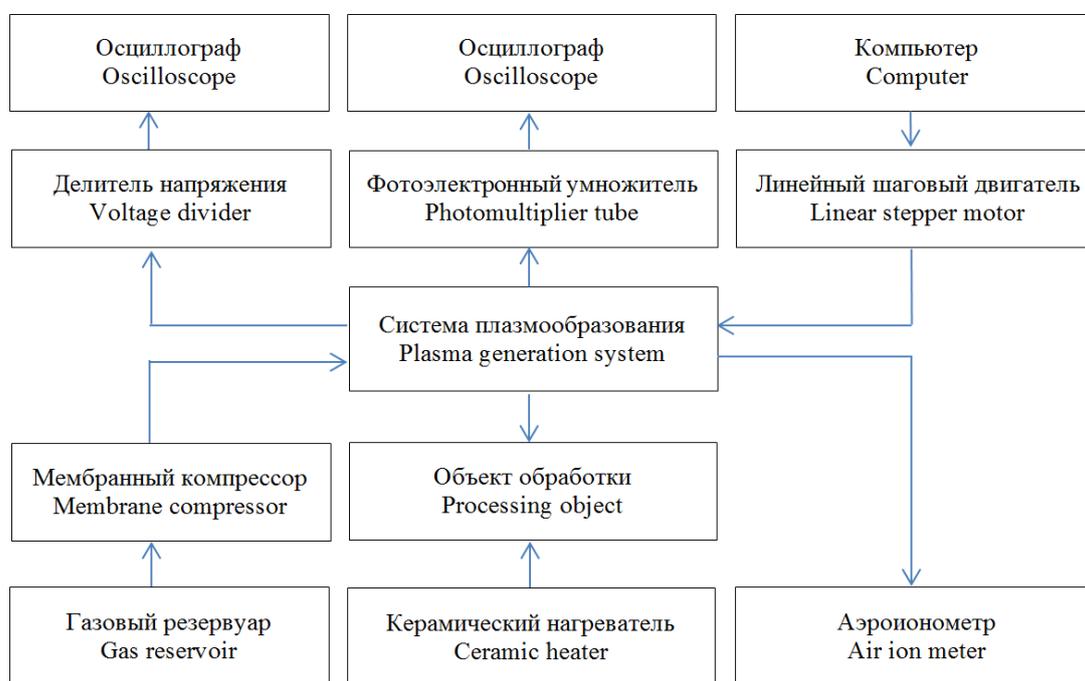


Рис. 1. Структурная схема исследовательского стенда
Fig. 1. Block diagram of the research stand



1 – осциллограф, 2 – линейный шаговый двигатель, 3 – компрессор, 4 – аэроионметр, 5 – каретка двигателя, 6 – устройство для возбуждения искрового импульсного разряда, 7 – кремниевая пластина, 8 – нагреватель, 9 – источник питания разрядной системы
1 – oscilloscope, 2 – linear stepper motor, 3 – compressor, 4 – air ion meter, 5 – stepper motor carriage, 6 – device for spark impulse discharge excitation, 7 – silicon wafer, 8 – heater, 9 – power supply for the discharge system

Рис. 2. Общий вид исследовательского стенда
Fig. 2. General view of the research stand

Таким образом совокупность представленных и используемых приборов и систем позволяет не только обеспечивать обработку поверхности материалов в достаточно широком диапазоне режимов при помощи различных разрядов в атмосфере газов (воздуха, кислорода, азота и др.), но и устанавливать корреляционные связи с целевыми показателями состояния поверхности.

Данные об апробации стенда

Примеры экспериментальных данных, полученных при изучении электрических режимов работы разрядных устройств, состава и характеристик плазменной среды, результатов управляемого плазменного модифицирования обработанных поверхностей материалов представлены на рис. 3 – 6 и в кратких комментариях к ним.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов напряжения ($U_{\text{вых}}$) на межэлектродном промежутке устройства для возбуждения искрового импульсного разряда при разной величине входного напряжения генераторного каскада ($U_{\text{вх}}$). Осциллограммы снимались во время горения разряда с использованием делителя напряжения 1:1000. Цена деления по оси X – 10 мкс/кл, по оси Y – 200 мВ/кл.

На осциллограммах видно, что увеличение питающего напряжения генераторного каскада приводит к увеличению длительности разрядных импульсов при несущественном изменении их амплитуды.

Результаты исследования электрических характеристик разрядного устройства барьерного типа показаны на рис. 4. Задающий генератор источника питания барьерного разряда работает на частоте до 1 кГц. Сформированные высоковольтные импульсы имеют внутреннюю структуру – высокочастотное заполнение в виде затухающих колебаний, обусловленных резонансными свойствами выходного высоковольтного трансформатора. Источник питания энергетической системы барьерного разряда позволяет регулировать амплитуду напряжения в пределах 20–40 кВ. Возможна обработка материалов как одиночными импульсами с частотой их следования 100 Гц, так и пачками импульсов.

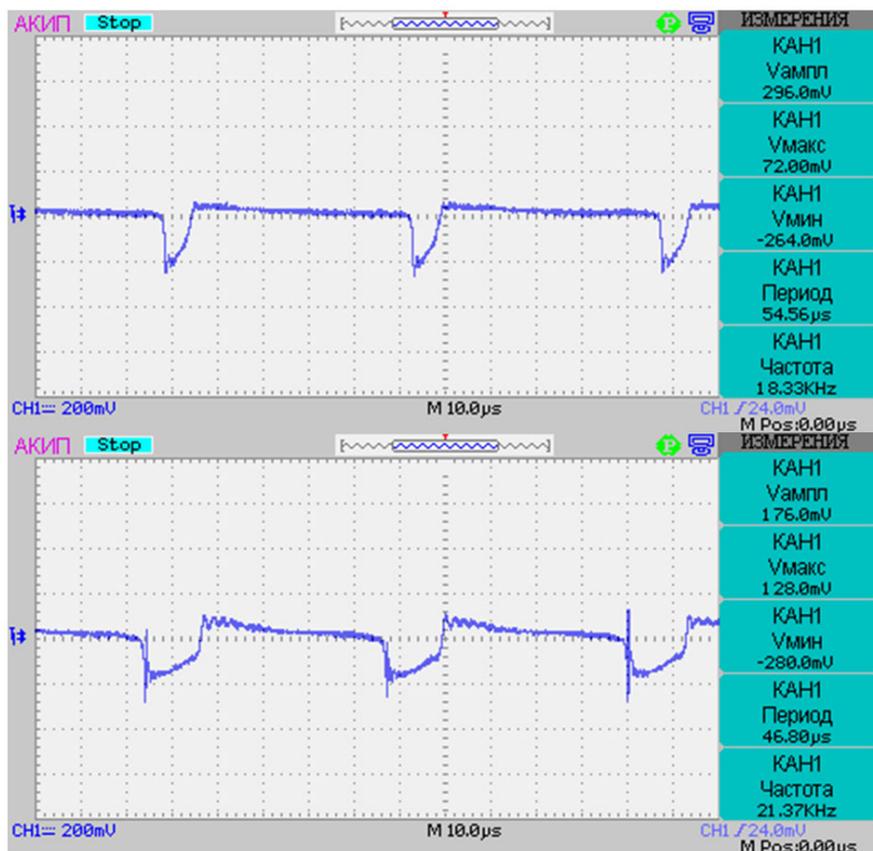


Рис. 3. Осциллограммы напряжения $U_{\text{вых}}$ на электродах устройства для возбуждения искрового импульсного разряда при величине входного напряжения $U_{\text{вх}}$, равной 3,5 В (вверху) и 6 В (внизу)
Fig. 3. Oscillograms of the voltage U_{out} on the electrodes of the spark pulse discharge excitation device at the value of the input voltage U_{in} equal to 3,5 V (above) 6V (below)

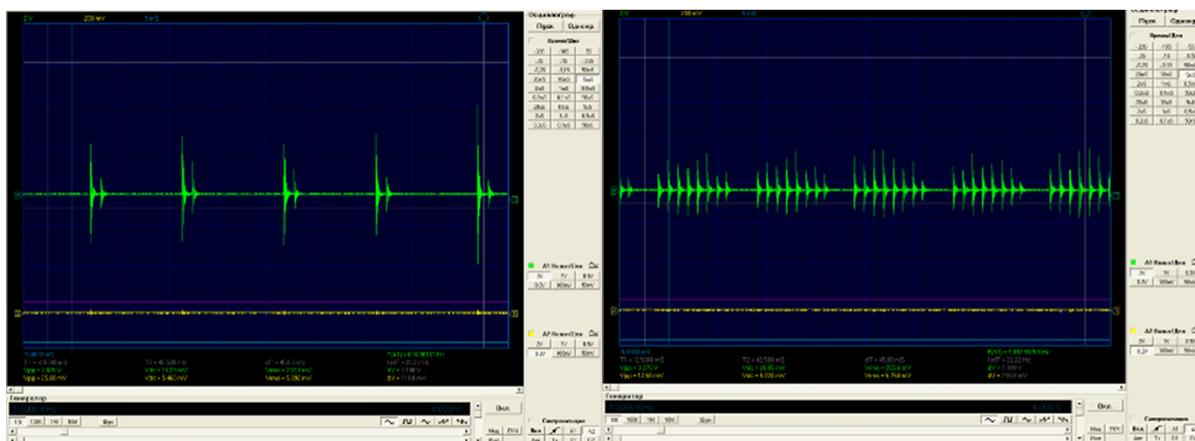


Рис. 4. Осциллограммы импульсов высоковольтного напряжения частотой $f \approx 100$ Гц (слева) и $f \approx 800$ Гц (справа) разрядного устройства барьерного типа
Fig. 4. Oscillograms of high-voltage pulses with a frequency of $f \approx 100$ Hz (left) and $f \approx 800$ Hz (right) of a barrier-type discharge device

На рис. 5 приведены фрагменты спектра излучения плазмы барьерного разряда в воздухе, полученные с использованием спектрометра SL 40-2-1024. Проведенные по ним расчеты величины газокинетической температуры плазмы T_g дали значения порядка 390 К.

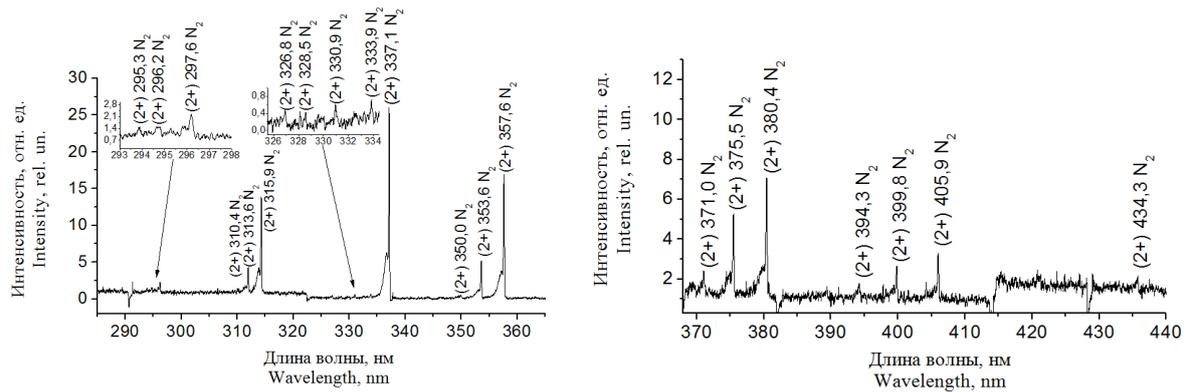


Рис. 5. Спектр излучения плазмы барьерного разряда в воздухе в области 290–360 нм (слева) и 370–440 нм (справа)
Fig. 5. Emission spectrum of barrier discharge plasma in air in the range of 290–360 nm (left) and 370–440 nm (right)

Оценка воздействия плазмы искрового разряда на поверхность материалов проводилась путем измерения краевого угла смачивания обработанных образцов (сталь, стекло, кремний) с использованием гониометра ЛК-1. Зависимость угла смачивания от времени обработки показана на рис. 5.

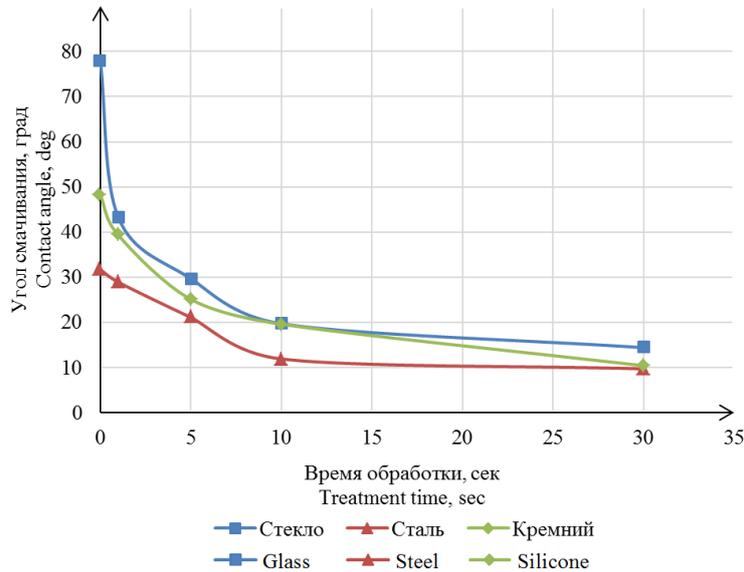


Рис. 5. Зависимость угла смачивания от времени обработки
Fig. 5. Dependence of the contact angle on the treatment time

Представленные зависимости показывают, что при обработке разрядом атмосферного давления в воздухе происходит активация поверхностей объектов, что приводит к повышению смачиваемости поверхностей и может быть использовано перед проведением таких операций, как склеивание, окраска, пайка и др. Данные результатов исследований позволяют сделать вывод о целесообразности и длительности обработки для достижения определенных свойств поверхности.

Выводы

Разработан исследовательский стенд для микроплазменной обработки поверхностей объектов. Исследовательский стенд предназначен для изучения процессов модификации поверхностей широкого ряда объектов (пластмасс, стекла, металлов и т. д.) и установления корреляционных связей режимов обработки с целевыми показателями состояния поверхности материалов.

Список литературы / References

1. Selwyn G.S., Herrmann H.W., Park J., & Henins I. Materials Processing Using an Atmospheric Pressure, RF-Generated Plasma Source. *Contributions to Plasma Physics*. 2001;41(6):610-619. DOI:10.1002/1521-3986(200111)41:6<610:aid-ctpp610>3.0.co;2-1.
2. Peran J., & Ercegović Ražić S. Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification. *Textile Research Journal*. 2019: 1-24. DOI:10.1177/0040517519883954.
3. d'Agostino R., Favia P., Kawai Y., Ikegami H., Sato N., Arefi-Khonsari F. *Advanced plasma technology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2008.
4. Yamamoto T., Okubo M. Nonthermal Plasma Technology. In: Wang L.K., Hung Y.T., Shammass N.K. (Eds.) *Advanced Physicochemical Treatment Technologies*; 2017: 135-293. Humana Press. DOI:10.1007/978-1-59745-173-4 4
5. Johansson K.S. Surface Modification of Plastics. In: *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition): Processing, Materials, and Applications*, 2017: 443-87. William Andrew Publishing. DOI: 10.1016/B978-0-323-39040-8.00020-1.
6. Meichsner J., Schmidt M., Schneider R., & Wagner H.-E. (Eds.). *Nonthermal Plasma Chemistry and Physics (1st ed.)*. CRC Press; 2013. DOI:10.1201/b12956.
7. Ono R. Optical diagnostics of reactive species in atmospheric-pressure nonthermal plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016; 49(8), 083001. DOI:10.1088/0022-3727/49/8/083001.
8. Veldhuizen van E.M., Rutgers W.R. Corona discharges: fundamentals and diagnostics. In *Frontiers in low temperature plasma diagnostics IV: papers, Rolduc Conference Centre, The Netherlands, 25.03–29.03.2001*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology; 2001: 40-49
9. Al-Abduly, Abdullah & Christensen P. An in situ and downstream study of non-thermal plasma chemistry in an air fed dielectric barrier discharge (DBD). *Plasma Sources Science and Technology*. 2015;24(6), 065006. DOI: 10.1088/0963-0252/24/6/065006.
10. Keller S., Rajasekaran P., Bibinov N., & Awakowicz P. Characterization of transient discharges under atmospheric-pressure conditions applying nitrogen photoemission and current measurements. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012;45(12), 125202. DOI:10.1088/0022-3727/45/12/125202.

Вклад авторов

Бордусов С.В. участвовал в выборе методик, постановке задач проведения исследований, выборе и обосновании состава оборудования и компоновочной схемы исследовательско-диагностического стенда.

Мадвейко С.И. участвовал в определении целей и задач исследований, разработке методик проведения экспериментов, обсуждении результатов экспериментов.

Барахоев А.Л. принял участие в сборке исследовательского стенда, настройке и отладке его режимов работы, участвовал в обсуждении методик и задач проводимых исследований, а также в обработке и интерпретации полученных результатов.

Тихон О.И. принял участие в разработке методик исследований и снятии электрических характеристик.

Моисеев А.А. принял участие в измерении краевого угла смачивания обработанных образцов.

Authors' contribution

Bordusov S.V. participated in the choice of research methods, setting of research tasks, selection and justification of the equipment composition and layout of the research and diagnostic stand.

Madveiko S.I. participated in defining the goals and objectives of the research, developing the methods of conducting experiments, and discussing the results of the experiments.

Barakhoev A.L. took part in assembling the research bench, setting up and adjusting the modes of operation of the research stand, took part in discussing the methods and objectives of the studies, as well as processing and interpreting the results.

Tikhon O.I. took part in the development of research methods and taking electrical characteristics.

Moiseev A.A. took part in measuring the wetting angle of the treated samples.

Сведения об авторах

Бордусов С.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мадвейко С.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Барахоев А.Л., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тихон О.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Моисеев А.А., магистрант кафедры электронной техники и технологии 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. +375-44-760-08-74;
e-mail: andreibarahoev@gmail.com
Барахоев Андрей Леонидович

Information about the authors

Bordusau S.V., D.Sc., Professor, Professor at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Madveika S.I., PhD, Associate Professor, Head of the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Barakhoyeu A.L., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsikhan O.I., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Maiseyeu A.A., Undergraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-44-760-08-74;
e-mail: andreibarahoev@gmail.com
Barakhoyeu Andrei Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-74-82>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323

НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЙ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С СИСТЕМОЙ ТЕПЛОТВОДА НА ОСНОВЕ КАНАВКИ В СЛОЕ ПАССИВАЦИИ, ЗАПОЛНЕННОЙ МАТЕРИАЛОМ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

В.С. ВОЛЧЁК, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 4 июня 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Эффект саморазогрева представляет собой главную проблему для мощных электронных и оптоэлектронных приборов на основе нитрида галлия. Неравномерное распределение рассеиваемой мощности и повышение средней температуры в структуре нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора приводят к появлению области с очень высокой температурой в окрестности проводящего канала, деградации тока стока и выходной мощности, а также ухудшению надежности прибора. Целью данной работы является разработка конструкции гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия с эффективной системой теплоотвода и исследование с помощью численного моделирования особенностей тепловых процессов, протекающих в структуре этого прибора. Объектами исследования служат созданные на сапфировой подложке приборные структуры, отличительными особенностями которых являются теплоотводящий элемент на основе графена, располагающийся на поверхности транзистора, и канавка в слое пассивации, заполненная материалом с высокой теплопроводностью. Предметом исследования являются электрические и тепловые характеристики указанных приборных структур. Результаты моделирования подтверждают эффективность внедрения в конструкцию гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия разработанной системы теплоотвода, позволяющей уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить эксплуатационные характеристики прибора. Преимущество предлагаемой концепции состоит в том, что теплоотводящий элемент конструктивно соединен с теплопоглощающим элементом и предназначен для отведения тепла непосредственно от области максимальной температуры через канавку в слое пассивации, в которой осажден слой материала с высокой теплопроводностью. Полученные результаты могут быть использованы предприятиями электронной промышленности Республики Беларусь при создании элементной базы силовой электроники на основе нитрида галлия.

Ключевые слова: гетероструктурный полевой транзистор, графен, нитрид галлия, саморазогрев, силовая электроника, слой пассивации, теплоотвод, теплопроводность, температура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводятся в рамках выполнения задания 3.1 государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций». Авторы выражают благодарность М.С. Барановой и Д.Ч. Гвоздовскому за предоставление данных о температурной зависимости теплопроводности нитридов элементов III группы и нитрида кремния.

Для цитирования. Волчѐк В.С., Стемпицкий В.Р. Нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, заполненной материалом с высокой теплопроводностью. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 74-82.

GALLIUM NITRIDE HETEROSTRUCTURE FIELD-EFFECT TRANSISTOR WITH A HEAT-REMOVAL SYSTEM BASED ON A TRENCH IN THE PASSIVATION LAYER FILLED BY A HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIAL

VLADISLAV S. VOLCHECK, VIKTOR R. STEMPIISKY

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

Submitted 4 June 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The self-heating effect poses a main problem for high-power electronic and optoelectronic devices based on gallium nitride. A non-uniform distribution of the dissipated power and a rise of the average temperature inside the gallium nitride heterostructure field-effect transistor lead to the formation of a hot spot near the conducting channel and result in the degradation of the drain current, output power and device reliability. The purpose of this work is to develop the design of a gallium nitride heterostructure field-effect transistor with an effective heat-removal system and to study using numerical simulation the thermal phenomena specific to this device. The objects of the research are the device structures formed on sapphire, each of whom features both a graphene heat-eliminating element on its top surface and a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material. The subject of the research is the electrical and thermal characteristics of these device structures. The simulation results verify the effectiveness of the integration of the heat-removal system into the gallium nitride heterostructure field-effect transistor that can mitigate the self-heating effect and improve the device performance. The advantage of our concept is that the graphene heat-eliminating element is structurally connected with a heat sink and is designed for removing the heat immediately from the maximum temperature area through the trench in which a high thermal conductivity material is deposited. The results can be used by the electronics industry of the Republic of Belarus for developing the hardware components of gallium nitride power electronics.

Keywords: heterostructure field-effect transistor, graphene, gallium nitride, self-heating simulation, power electronics, passivation layer, heat-removal system, thermal conductivity, temperature.

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

Gratitude. This work is supported by the grant 3.1 of Belarusian National Scientific Research Program “Photonics and Electronics for Innovations”. The authors would like to express special thanks to Baranova M.S. and Hvazdouski D.C. for providing the data on the temperature dependence of the thermal conductivity of the group III nitrides and silicon nitride.

For citation. Volcheck V.S., Stempitsky V.R. Gallium nitride heterostructure field-effect transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 74-82.

Введение

Эффект саморазогрева представляет собой главную проблему для мощных электронных и оптоэлектронных приборов, изготавливаемых на основе нитрида галлия. Неравномерное распределение рассеиваемой мощности и повышение средней температуры в структуре нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора (транзистора с высокой подвижностью электронов, ТВПЭ) приводят к появлению области с очень высокой температурой в окрестности проводящего канала, деградации тока стока и выходной мощности, а также ухудшению надежности прибора [1]. Для уменьшения влияния эффекта саморазогрева предлагается ряд технологических решений, таких как монтаж приборной структуры методом перевернутого кристалла на подложку с высокой теплопроводностью, например, нитрид алюминия [2]; атомарное присоединение поликристаллического алмаза, выращенного методом осаждения

из газовой фазы (англ. chemical vapor deposition, CVD), к эпитаксиальной структуре вместо стравленной подложки кремния [3]; рост эпитаксиальной структуры на монокристаллической подложке алмаза методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы [4]; создание в подложке кремния канавки и осаждение на ее стенки комбинации AlN/Cu [5]; интеграция в конструкцию ТВПЭ теплоотводящих элементов на основе алмазоподобных соединений [6]. Ширина запрещенной зоны нитрида галлия равна 3,4 эВ, что обуславливает высокое значение напряжения электрического пробоя. Кроме того, скорость насыщения электронов в нитриде галлия минимум в два раза выше, чем у кремния. Благодаря этим свойствам нитрид-галлиевые транзисторы могут выдерживать очень большие плотности мощности, порядка нескольких десятков ватт на миллиметр ширины канала. Однако при таких уровнях мощности омический нагрев приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик прибора и, несмотря на предлагаемые решения, эффект саморазогрева по-прежнему остается насущной проблемой.

В статье [7] представлены результаты приборного моделирования нитрид-галлиевого ТВПЭ с теплоотводящим элементом на основе графена. В продолжение этих исследований проведена серия расчетов электрических и тепловых характеристик усложненной приборной структуры ТВПЭ на основе нитрида галлия. В настоящей работе конструкция транзистора включает в свой состав систему теплоотвода, состоящую из графенового теплоотводящего элемента, конструктивно соединенного с теплопоглощающим элементом и предназначенного для отведения тепла непосредственно от области максимальной температуры через канавку в слое пассивации, в которой осажден материал с высокой теплопроводностью. Эффективность предлагаемой системы теплоотвода оказывается выше, чем у системы, состоящей лишь из теплоотводящего элемента, расположенного на поверхности слоя пассивации.

Приборная структура

Объектом исследования является приборная структура нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе сформированной в слое пассивации канавки, в которой осажден слой материала с высокой теплопроводностью (рис. 1).

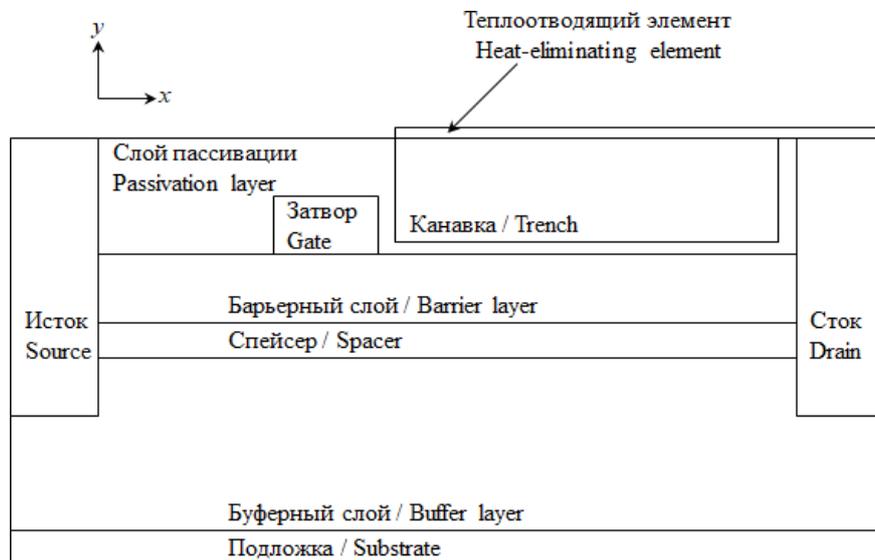


Рис. 1. Приборная структура нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, заполненной материалом с высокой теплопроводностью

Fig. 1. Device structure of the gallium nitride high electron mobility transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material

В качестве материала подложки исследуемой приборной структуры выбран сапфир. Толщина области моделирования подложки составляет 20 мкм. Толщины буферного слоя (GaN), спейсера (AlN), барьерного слоя ($Al_{0,2}Ga_{0,8}N$) и слоя пассивации (Si_3N_4) равны 1,5 мкм, 2 нм, 20 нм и 0,2 мкм соответственно. В качестве материалов с высокой теплопроводностью,

используемых для осаждения в канавке, исследуются арсенид бора (вариант конструкции С), нитрид бора (вариант D) и CVD-алмаз (вариант E). Длина и толщина канавки равны 4,8 мкм и 0,19 мкм, расстояния между ее левой стенкой и затвором, а также между правой стенкой и стоком – 0,1 мкм. Длина и толщина теплоотводящего элемента на основе графена составляют 5,9 мкм и 10 нм соответственно. Длина и толщина затвора – 0,5 мкм и 0,1 мкм. Ширина приборной структуры равна 0,1 мм.

Для сравнения электрических и тепловых характеристик также выполнен расчет двух приборных структур, в одной из которых (вариант конструкции В) отсутствует канавка в слое пассивации, заполненная материалом с высокой теплопроводностью, а в другой – и канавка, и теплоотводящий элемент (вариант А).

Формирование канавки в слое нитрида кремния может быть осуществлено, например, с помощью метода реактивного ионного травления на основе смеси CCl_2F_2/O_2 , позволяющей получить канавку с практически вертикальными стенками и плоским дном [8]. Благодаря идентичным коэффициентам теплового расширения, нитрид кремния теоретически является идеальной подложкой для осаждения CVD-алмаза [9]. Технологическая сложность создания графенового теплоотводящего элемента на поверхности структуры транзистора заключается в том, что технология механического расщепления высокоориентированного пиролитического графита неприменима для этой цели вследствие случайного характера процесса получения графена. По этой причине предлагается альтернативный метод, в основе которого лежит использование полиметилметакрилата в роли вспомогательных мембран [1].

Уравнения и модели

Приборное моделирование исследуемых вариантов конструкции ТВПЭ на основе нитрида галлия выполнялось в рамках классической диффузионно-дрейфовой теории с моделью подвижности класса Коэ – Томаса [10]. Моделирование тепловых процессов, протекающих в транзисторе во время его работы, осуществляется путем самосогласованного решения системы дифференциальных уравнений, включающей уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и уравнение теплового потока. В динамически равновесном состоянии уравнение теплового потока принимает вид

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + H = 0, \quad (1)$$

где C – теплоемкость, T – температура, κ – теплопроводность, H – скорость тепловыделения.

Модель для определения теплопроводности AlN, GaN, Si_3N_4 , BAs [11], BN [12] и CVD-алмаза [11] от температуры имеет следующий вид:

$$\kappa(T) = \kappa(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где α – коэффициент температурной зависимости.

Значения теплопроводности AlN, GaN и Si_3N_4 в диапазоне температур 20–1000 К были получены посредством моделирования из первых принципов и решения линеаризованного фононного уравнения переноса Больцмана. На базе рассчитанных данных были подобраны степенные функции вида (2), наиболее точно описывающие температурную зависимость теплопроводности указанных материалов.

Теплопроводность AlGaIn определяется согласно формуле

$$\kappa(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = \left(\frac{x}{\kappa(\text{AlN})} + \frac{1-x}{\kappa(\text{GaN})} + (3,649 \cdot 10^{-5} T - 2,21 \cdot 10^{-3}) x(1-x) \right)^{-1}, \quad (3)$$

где x – содержание алюминия.

Теплопроводность Al_2O_3 определяется по формуле [13]

$$\kappa(\text{Al}_2\text{O}_3) = 51292 T^{-1,2868} + 1,7688 \cdot 10^{-3} T. \quad (4)$$

Параметры модели для определения теплопроводности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры модели для определения теплопроводности
Table 1. Thermal conductivity model parameters

Параметр / Parameter	Материал / Material					
	AlN	GaN	Si ₃ N ₄	BAs	BN	CVD-алмаз
κ (300 K) (Вт/(м·К))	389	258	86	1433	837	2174
α	-1,28	-1,03	-1,2	-1,63	-0,97	-1,17

Результаты моделирования

Серия расчетов электрических и тепловых характеристик выполнялась при следующих условиях:

- донорная примесь в барьерном слое отсутствует;
- в буферный слой внедрены акцепторные ловушечные центры, энергетический уровень которых лежит на 0,7 эВ ниже дна зоны проводимости, а профиль распределения плотности состояний соответствует профилю, обозначенному как «low-Fe» в работе [14];
- контактное тепловое сопротивление между подложкой и окружающей средой, а также между правой стороной теплоотводящего элемента и окружающей средой принято равным нулю, чтобы температура на нижней поверхности подложки и на правом крае теплоотводящего элемента была фиксированной;
- поскольку в используемой системе компьютерного проектирования графен не поддерживается (значения его параметров отсутствуют в базе данных), материал теплоотводящего элемента рассмотрен как проводник (является электродом – стоком) с соответствующим графену коэффициентом теплопроводности, равным 5000 Вт/(м·К) [15].

На рис. 2 приведены сток-затворная характеристика и зависимость передаточной проводимости (крутизны) от напряжения затвор-исток ($V_{зи}$) ТВПЭ на основе нитрида галлия при напряжении сток-исток ($V_{си}$), равном 0,1 эВ.

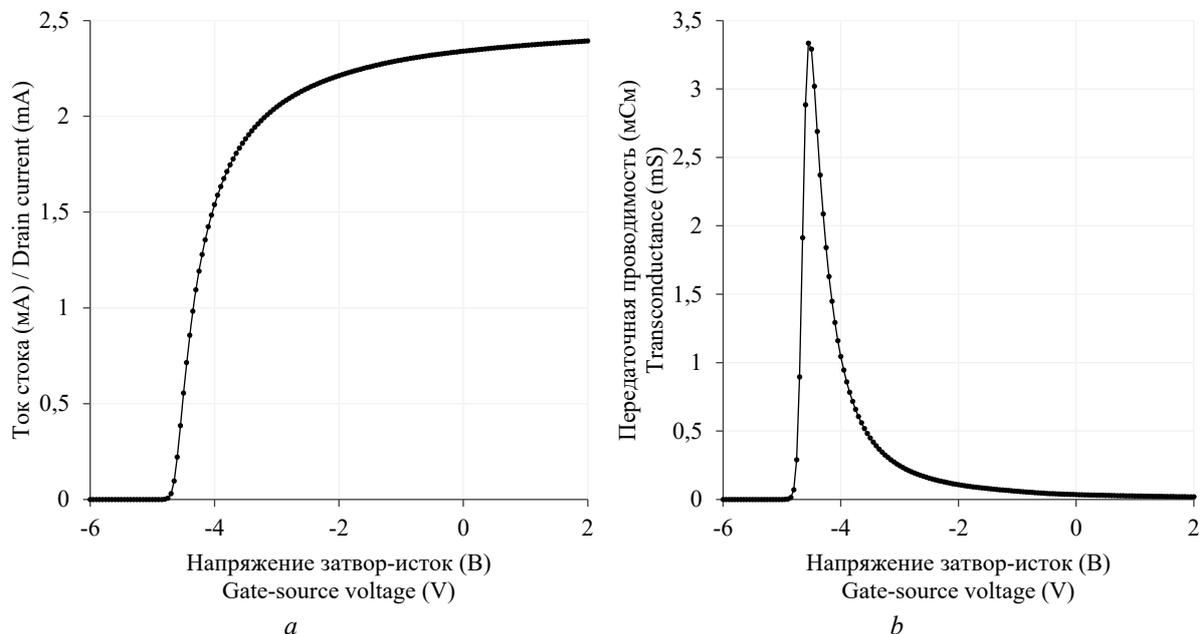


Рис. 2. Входные характеристики ($V_{си} = 0,1$ В): *a* – сток-затворная характеристика; *b* – зависимость передаточной проводимости от напряжения затвор-исток

Fig. 2. Input characteristics (drain-source voltage (V_{DS}) is 0.1 V): *a* – drain current vs. gate-source voltage (V_{GS}); *b* – transconductance vs. gate-source voltage

При достаточно малом напряжении сток-исток температура транзистора практически совпадает с температурой окружающей среды и, следовательно, входные электрические характеристики будут идентичны для всех рассматриваемых вариантов его конструкции.

На рис. 3 показаны сток-стоковые характеристики и зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 2$ В) исследуемых вариантов конструкции ТВПЭ на основе нитрида галлия. В случае использования CVD-алмаза в качестве материала, осаждаемого в канавке в слое пассивации, наблюдается увеличение тока стока и выходной мощности, которое при $V_{зи} = 2$ В и $V_{си} = 15$ В составляет 28,5 % относительно величин для прибора без какой-либо системы теплоотвода. Ток стока возрастает со значения 0,057 до 0,073 А, а выходная мощность – со значения 0,852 до 1,095 Вт. Аналогичные показатели при осаждении слоев арсенида бора и нитрида бора находятся на уровне 24,3 и 21,8 % (токи стока равны 0,071 и 0,069 А, выходные мощности – 1,059 и 1,038 Вт соответственно). Если система теплоотвода включает лишь теплоотводящий элемент на основе графена, ток стока и выходная мощность повышаются на 14,6 %.

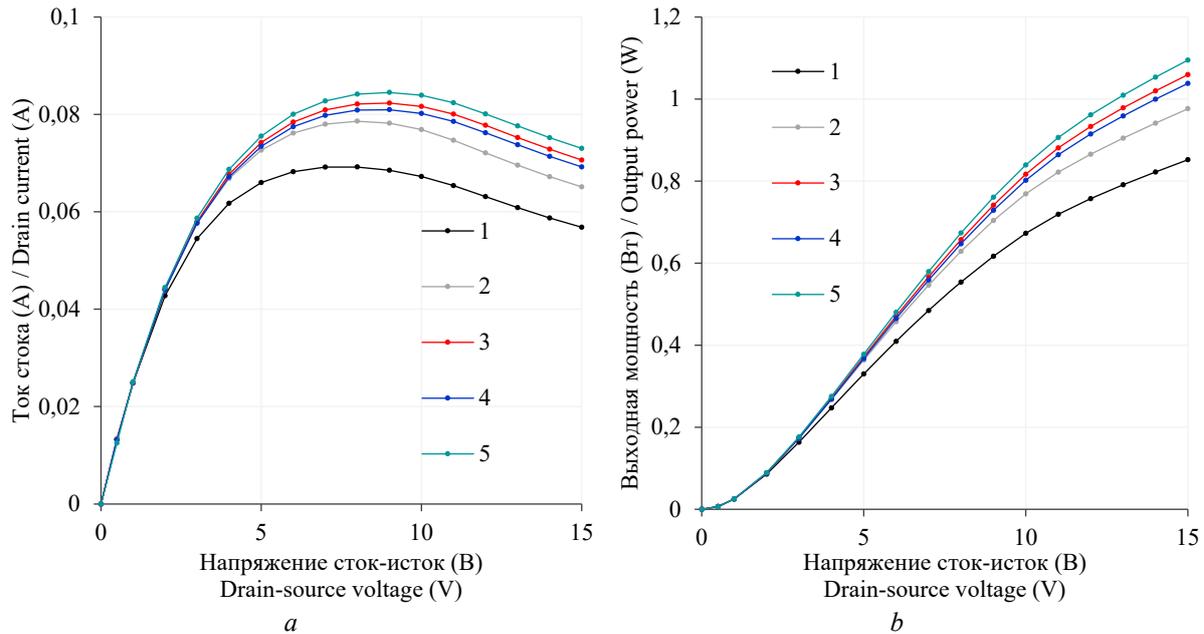


Рис. 3. Выходные характеристики ($V_{зи} = 2$ В) (1 – вариант конструкции А; 2 – вариант В; 3 – вариант С; 4 – вариант D; 5 – вариант E): *a* – сток-стоковые характеристики; *b* – зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток

Fig. 3. Output characteristics ($V_{GS} = 2$ V) (1 – variant A of the structure; 2 – variant B; 3 – variant C; 4 – variant D; 5 – variant E): *a* – drain current vs. drain-source voltage; *b* – output power vs. drain-source voltage

Тепловые характеристики, включающие профили распределения тепловыделения вдоль канала и зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток, исследуемых вариантов конструкции ТВПЭ на основе нитрида галлия показаны на рис. 4. Для удобства восприятия графического материала представлены только фрагменты профилей распределения тепловыделения, рассчитанные в окрестности затвора при $V_{зи} = 2$ В и $V_{си} = 15$ В. При этом правой границе затвора соответствует координата $x = 3,5$ мкм. Зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток получены при $V_{зи} = 2$ В.

На рис. 4, *a* отчетливо видны пики тепловыделения, расположенные у границы затвора со стороны стока. В случае использования CVD-алмаза в качестве материала, осаждаемого в канавке в слое пассивации, максимальный локальный омический нагрев увеличивается на 52,5 % относительно соответствующей величины для прибора без системы теплоотвода (со значения $3,906 \cdot 10^{12}$ до $5,957 \cdot 10^{12}$ Дж/см³). Однако при этом наблюдается снижение максимальной температуры на 50,2 К (со значения 474,3 до 424,1 К). При осаждении слоев арсенида бора и нитрида бора максимальный омический нагрев увеличивается на 42,8 и 38,7 % (до значений $5,578 \cdot 10^{12}$ и $5,419 \cdot 10^{12}$ Дж/см³ соответственно). В этих случаях уменьшение максимальной температуры составляет 44,7 и 41,1 К (до значений 429,6 и 433,2 К соответственно). Если система теплоотвода включает лишь теплоотводящий элемент на основе графена, максимальный омический нагрев повышается на 29,8 % (до значения $5,072 \cdot 10^{12}$ Дж/см³), а максимальная температура снижается на 27,5 К (до значения 446,8 К).

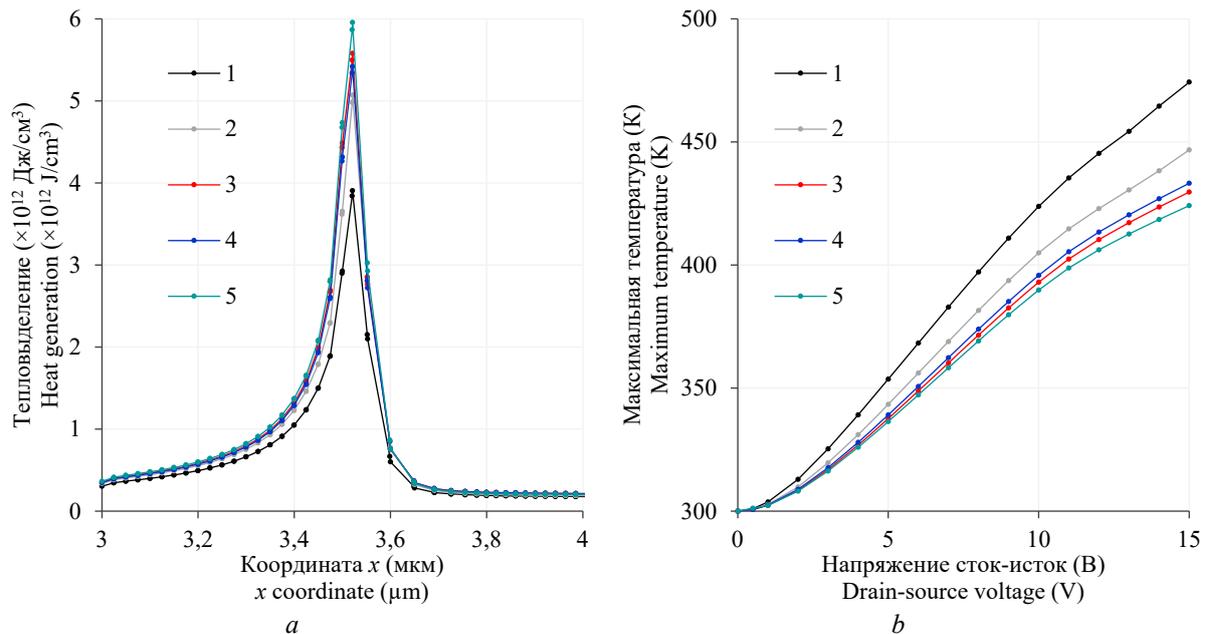


Рис. 4. Тепловые характеристики (1 – вариант А; 2 – вариант В; 3 – вариант С; 4 – вариант D; 5 – вариант Е): *a* – профили распределения тепловыделения вдоль канала ($V_{\text{зи}} = 2$ В, $V_{\text{си}} = 15$ В); *b* – зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток ($V_{\text{зи}} = 2$ В)
Fig. 4. Thermal characteristics (1 – variant A; 2 – variant B; 3 – variant C; 4 – variant D; 5 – variant E): *a* – heat generation profiles along the channel ($V_{GS} = 2$ V, $V_{DS} = 15$ V); *b* – maximum temperature vs. drain-source voltage ($V_{GS} = 2$ V)

Заключение

В статье предложена конструкция нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе сформированной в слое пассивации канавки, в которой осажден материал с высокой теплопроводностью. С помощью численного моделирования выполнена оценка электрических и тепловых характеристик трех вариантов конструкции, в которых в качестве материала, заполняющего канавку, применяются арсенид бора, нитрид бора и CVD-алмаз. Результаты расчетов подтверждают эффективность разработанной системы теплоотвода, позволяющей уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить характеристики транзистора. При этом выяснено, что наибольшую эффективность система теплоотвода имеет в случае использования CVD-алмаза (при $V_{\text{зи}} = 2$ В и $V_{\text{си}} = 15$ В выходная мощность повышается на 28,5 %, а максимальная температура снижается на 50,2 К).

Список литературы / References

1. Yan Z., Liu G., Khan J.M., Balandin A.A. Graphene Quilts for Thermal Management of High-Power GaN Transistors. *Nature Communications*. 2012;3:827. DOI: 10.1038/ncomms1828.
2. Sun J., Fatima H., Koudymov A., Chitnis A., Hu X., Wang H.-M., Zhang J., Simin G., Yang J., Asif Khan M. Thermal Management of AlGaIn-GaN HFETs on Sapphire Using Flip-Chip Bonding with Epoxy Underfill. *IEEE Electron Device Letters*. 2003;24(6):375-377. DOI: 10.1109/LED.2003.813362.
3. Felbinger J.G., Chandra M.V.S., Sun Y., Eastman L.F., Wasserbauer J., Faili F., Babic D., Francis D., Ejeckam F. Comparison of GaN HEMTs on Diamond and SiC Substrates. *IEEE Electron Device Letters*. 2007;28(11):948-950. DOI: 10.1149/2.0441712jss.
4. Hirama K., Taniyasu Y., Kasu M. AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistors with Low Thermal Resistance Grown on Single-Crystal Diamond (111) Substrates by Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2011;98(16):162112. DOI: 10.1063/1.3574531.
5. Pavlidis G., Kim S.H., Abid I., Zegaoui M., Medjdoub F., Graham S. The Effects of AlN and Copper Back Side Deposition on the Performance of Etched Back GaN/Si HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*. 2019;40(7):1060-1063. DOI: 10.1109/LED.2019.2915984.

6. Grishakov K.S., Elesin V.F., Kargin N.I., Ryzhuk R.V., Minnebaev S.V. Effect of a Diamond Heat Spreader on the Characteristics of Gallium-Nitride-Based Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):41-53. DOI: 10.1134/S1063739716010054.
7. Волчѣк В.С., Ловшенко И.Ю., Шандарович В.Т., Дао Динь Ха. Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена. *Доклады БГУИР*. 2020;18(3):72-80. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80. Volcheck V.S., Lovshenko I.Yu., Shandarovich V.T., Dao Dinh Ha. [Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor with an Effective Graphene-Based Heat Removal System]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(3):72-80. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80. (In Russ.)
8. Pant B.D., Tandon U.S. Etching of Silicon Nitride in CCl_2F_2 , CHF_3 , SiF_4 , and SF_6 Reactive Plasma: A Comparative Study. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1999;19(4):545-563. DOI: 10.1023/A:1021886511288.
9. Bland H.A., Thomas E.L.H., Klemencic G.M., Mandal S., Morgan D.J., Papageorgiou A., Jones T.G., Williams O.A. Superconducting Diamond on Silicon Nitride for Device Applications. *Scientific Reports*. 2019;9:2911. DOI: 10.1038/s41598-019-39707-z.
10. Farahmand M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K.F., Goano M., Ghillino E., Ghione G., Albrecht J.D., Ruden P.P. Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001;48(3):535-542. DOI: 10.1109/16.906448.
11. Feng T., Lindsay L., Ruan X. Four-Phonon Scattering Significantly Reduces Intrinsic Thermal Conductivity of Solids. *Physical Review B*. 2017;96:161201(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.161201.
12. Chen K. Ultrahigh Thermal Conductivity in Isotope-Enriched Cubic Boron Nitride. *Science*. 2020;367(6477):555-559. DOI: 10.1126/science.aaz6149.
13. Hofmeister A.M. Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Single-Crystal MgO and Al_2O_3 and Related Compounds as a Function of Temperature. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2014;41:361-371. DOI: 10.1007/s00269-014-0655-3.
14. Dao Dinh Ha, Trung Tran Tuan, Volcheck V.S., Stempitsky V.R. Iron-Induced Acceptor Centers in the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor: Thermal Simulation and Analysis. *2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. 2019:308-312. DOI: 10.1109/ATC.2019.8924506.
15. Balandin A.A. Thermal Properties of Graphene and Nanostructured Carbon Materials. *Nature Materials*. 2011;10:569-581. DOI: 10.1038/NMAT3064.

Вклад авторов

Волчѣк В.С. осуществил настройку моделей, используемых при моделировании; выполнил серию расчетов электрических и тепловых характеристик исследуемых вариантов конструкции нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, в которой осажден материал с высокой теплопроводностью; подготовил рукопись статьи.

Стемпичкий В.Р. сформулировал цель и задачи исследований, определил составные элементы конструкции транзистора с указанной системой теплоотвода.

Authors' contribution

Volcheck V.S. has adjusted the models used in the simulation; has calculated the electrical and thermal characteristics of the variants of the gallium nitride high electron mobility transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material; has prepared the manuscript.

Stempitsky V.R. has formulated the purpose and the problems of the work; has chosen the components of the transistor with the heat-removal system indicated above.

Сведения об авторах

Волчѣк В.С., научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Стемпіцкі В.Р., к.т.н., доцент, начальник НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 17 293 84 09;
e-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Волчѣк Владислав Сергеевич

Information about the authors

Volcheck V.S., Researcher at the R&D Laboratory 4.4 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Stempitsky V.R., PhD, Associate Professor, Head of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
тел. +375 17 293 84 09;
e-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Volcheck Vladislav Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-83-91>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЫБОРОЧНОГО СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ЯРКОСТИ ОБЛАСТИ ПО МАРШРУТУ РОСТА

В.Ю. ЦВЕТКОВ

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

Поступила в редакцию 25 июня 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Рассматривается задача параллельной сегментации полутоновых изображений по яркости для реализации на базе программируемых логических интегральных схем. Сегментация разделяет изображение на области, образованные из пикселей с примерно одинаковыми яркостями, и является вычислительно сложной операцией из-за многократной проверки значения каждого пикселя на возможность присоединения к смежной области. Для ускорения сегментации разработаны параллельные алгоритмы выращивания областей, в которых обработка начинается с окрестностей предварительно выделенных начальных пикселей роста. Условие присоединения к области смежного пикселя учитывает среднюю яркость области для ограничения дисперсии значений ее пикселей. Поэтому при добавлении к области каждого нового пикселя ее средняя яркость пересчитывается. Это приводит к высокой временной сложности. В некоторых параллельных алгоритмах вычисляется выборочное среднее в окне небольшого размера, что позволяет незначительно снизить временную сложность при согласовании размера окна с размерами сегментов. Для существенного снижения временной сложности в статье предложена модель параллельного выращивания областей изображения на основе упрощенного условия присоединения смежных пикселей к области, учитывающего выборочное среднее значение яркости области по маршруту роста, связывающему граничный пиксель области и начальный пиксель роста через последовательность пикселей, используемых для присоединения рассматриваемого граничного пикселя к области. Существенное уменьшение временной сложности предложенной модели параллельного выращивания областей изображения по сравнению с известными моделями достигается за счет незначительного увеличения пространственной сложности.

Ключевые слова: параллельная сегментация изображений, выращивание областей изображений, выборочное среднее значение яркости, маршрут роста.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Цветков В.Ю. Параллельное выращивание областей полутоновых изображений на основе выборочного среднего значения яркости области по маршруту роста. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 83-91.

PARALLEL REGION GROWING OF HALF-TONE IMAGES BASED ON SELECTED AVERAGE BRIGHTNESS OF THE AREA ALONG THE GROWTH ROUTE

VIKTAR YU. TSVIATKOU

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

Submitted 25 June 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The problem of parallel segmentation of halftone images by brightness for implementation on the basis of programmable logic integrated circuits is considered. Segmentation divides an image into regions formed from pixels with approximately the same brightness, and is a computationally complex operation due to multiple checks of the value of each pixel for the possibility of joining an adjacent region. To speed up segmentation, parallel algorithms for growing areas have been developed, in which processing begins from the neighborhoods of pre-selected initial growth pixels. The condition of joining an adjacent pixel to an area takes into account the average brightness of the area to limit the variance of its pixel values. Therefore, when each new pixel is added to the area, its average brightness is recalculated. This leads to high time complexity. In some parallel algorithms, the sample mean is calculated in a small window, which makes it possible to slightly reduce the time complexity when matching the window size with the segment sizes. To significantly reduce the temporal complexity, the article proposes a model for the parallel growth of image regions based on a simplified condition for joining adjacent pixels to a region, taking into account the sample average value of the region's brightness along the growth route connecting the boundary pixel of the region and the initial growth pixel through a sequence of pixels used to attach the considered boundary pixel to area. A significant decrease in the temporal complexity of the proposed model of parallel growing of image regions in comparison with the known models is achieved due to a slight increase in the spatial complexity.

Keywords: parallel image segmentation, region growing of images, sample mean brightness, growth route.

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

For citation. Tsviatkou V.Yu. Parallel region growing of half-tone images based on selected average brightness of the area along the growth route. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 83-91.

Введение

Сегментация изображений – одна из наиболее вычислительно сложных операций. Для ее ускорения разработано множество параллельных алгоритмов, которые могут быть отнесены к следующим основным типам: пороговые [1], водораздела [2], выращивания областей от начальных точек (SRG – Seed Region Growing) [3], контурные [4], вероятностные [5]. Эти алгоритмы используют различные модели и методы обработки: морфологические [6], градиентные [7], оптимизационные [8], графы [9], генетические [1], клеточные [10], нейросетевые [11]. Причем при реализации большинства алгоритмов сегментации на GPU (Graphics Processing Unit) или FPGA (Field-Programmable Gate Array) распараллеливаются только отдельные операции.

Наибольшую регулярность и параллелизм обеспечивают алгоритмы сегментации типа SRG [3], но для достижения существенного выигрыша в скорости сегментации по сравнению с последовательными алгоритмами они требуют эффективных вычислений для проверки условия присоединения смежных пикселей к области, которое в базовом алгоритме [12] учитывает яркости всех сегментированных пикселей области.

Целью работы является уменьшение временной сложности параллельного выращивания областей изображений за счет упрощения условия присоединения смежных пикселей к области при минимальных потерях в качестве сегментации.

Постановка задачи

В результате сегментации изображения $I = \|i(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ размером $Y \times X$ пикселей формируется матрица $S = \|s(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ сегментации такого же размера, значения элементов которой указывают на номера $n \in [0, N]$ сегментов, которым они принадлежат, где N – число сегментов и номер последнего сегмента. Для выращивания областей от N начальных точек (SRG [12]) справедлива следующая базовая модель:

$$\begin{aligned} & (s(y, x) = 0) \wedge (s(y_0, x_0) = n) \wedge (n > 0) \wedge (|y_0 - y| \leq 1) \wedge (|x_0 - x| \leq 1) \wedge \\ & \wedge (|i(y, x) - \bar{i}(n)| < q) \Rightarrow (s(y, x) \leftarrow n), \end{aligned} \quad (1)$$

где q – порог, определяющий степень сегментации изображения; $\bar{i}(n)$ – средняя яркость области n .

Алгоритм выращивания областей SRG описывает следующую последовательность операций (предполагается, что начальные пиксели роста на изображении уже выделены).

1. Координаты очередного начального пикселя роста помещаются в стеки $Y_F = \|y_F(p_F)\|_{(p_F=0, P_F-1)}$ и $X_F = \|x_F(p_F)\|_{(p_F=0, P_F-1)}$ координат смежных пикселей, где p_F – указатель стеков; P_F – максимально возможное число координат в стеках Y_F и X_F .

2. Определяется текущее значение n номера сегмента.

3. Из стеков Y_F и X_F извлекаются координаты (y, x) очередного обрабатываемого пикселя; соответствующему элементу матрицы сегментации $s(y, x)$ присваивается значение n номера сегмента; проверяется выполнение условия присоединения к текущему пикселю (y, x) смежных пикселей с координатами $(y+y', x+x')$ при $(y' = -1, 1) \wedge (x' = -1, 1) \wedge ((y' \neq 0) \vee (x' \neq 0))$; если для какого-либо смежного пикселя условие выполняется, то его координаты $(y+y', x+x')$ заносятся в стеки Y_F и X_F . Условие присоединения в [12] основано на оценке разности средней яркости области и яркости проверяемого смежного пикселя. Таким образом, за одну итерацию к области присоединяется один или несколько пикселей с яркостью, близкой к средней яркости области, после чего среднее значение области пересчитывается.

Шаги 1 – 3 повторяются до тех пор, пока все начальные пиксели роста не будут обработаны. В результате изображение разделяется на области с дисперсией яркости, ограниченной задаваемым порогом.

В базовой модели SRG средняя яркость $\bar{i}(n)$ каждой области пересчитывается в случае присоединения каждого нового пикселя. Поэтому алгоритм SRG плохо распараллеливается.

Для распараллеливания вычислений и сокращения числа операций обращения к памяти модификации базового алгоритма SRG используют упрощенные условия присоединения смежных пикселей к области, позволяющие увеличить их число за одну итерацию и скорость роста области. В пределе упрощения используется оценка разности яркости $i(y_0, x_0)$ пикселя области и яркости $i(y, x)$ проверяемого смежного пикселя, описываемая следующей простейшей моделью (SRG-S):

$$\begin{aligned} & (s(y, x) = 0) \wedge (s(y_0, x_0) = n) \wedge (n > 0) \wedge (|y_0 - y| \leq 1) \wedge (|x_0 - x| \leq 1) \wedge \\ & \wedge (|i(y, x) - i(y_0, x_0)| < q) \Rightarrow (s(y, x) \leftarrow n). \end{aligned} \quad (2)$$

Простейшая модель SRG-S позволяет сократить число операций обращения к памяти и эффективно распараллелить вычисления, но приводит к ухудшению качества сегментации, проявляющемуся в увеличении дисперсии значений пикселей в пределах области (недостаточной сегментации) при большом пороге или росте числа областей (избыточной сегментации) при малом пороге.

Для сохранения качества сегментации в [13] используется оконная модель SRG-W на основе выборочного среднего $\bar{i}(y_0, x_0, W)$, вычисляемого для граничного пикселя (y_0, x_0) сегмента в окне размером $W \times W$ пикселей ($W = 2w + 1$, где $w > 0$), описываемая выражением

$$(s(y, x) = 0) \wedge (s(y_0, x_0) = n) \wedge (n > 0) \wedge (|y_0 - y| \leq 1) \wedge (|x_0 - x| \leq 1) \wedge (|i(y, x) - \bar{i}(y_0, x_0, w)| < q) \Rightarrow (s(y, x) \leftarrow n). \quad (3)$$

Выборочное среднее вычисляется с помощью выражения

$$\bar{i}(y_0, x_0, w) = \frac{\sum_{d_y=-w}^w \sum_{d_x=-w}^w (i(y_0 + d_y, x_0 + d_x) \cdot f_s(s(y_0 + d_y, x_0 + d_x), s(y_0, x_0)))}{\sum_{d_y=-w}^w \sum_{d_x=-w}^w f_s(s(y_0 + d_y, x_0 + d_x), s(y_0, x_0))}, \quad (4)$$

где $f_s(s(y_0 + d_y, x_0 + d_x), s(y_0, x_0))$ – предикат, определяемый с помощью выражения

$$f_s(s(y_0 + d_y, x_0 + d_x), s(y_0, x_0)) = \begin{cases} 1 & \text{при } s(y_0 + d_y, x_0 + d_x) = s(y_0, x_0), \\ 0 & \text{при } s(y_0 + d_y, x_0 + d_x) \neq s(y_0, x_0). \end{cases} \quad (5)$$

Оконная модель SRG-W позволяет уменьшить число операций обращения к памяти при небольшом размере окна и распараллелить обработку неперекрывающихся окон. При этом вычисления среднего в пределах каждого окна остаются последовательными. Такая многооконная процедура обработки может быть достаточно эффективно реализована на GPU, но не подходит для FPGA из-за высокой сложности организации параллельного доступа к общей памяти.

Анализ особенностей алгоритмов сегментации показывает, что снижение сложности и повышение степени параллелизма вычислений при проверке условия присоединения смежного пикселя к области возможно за счет пересчета выборочного среднего области не в окне, а вдоль траектории роста, связывающей соответствующий граничный пиксель области с ее начальной точкой роста через последовательность пикселей, используемых для присоединения рассматриваемого граничного пикселя к области. На исследование эффективности данного подхода направлена настоящая работа.

Модель и алгоритм параллельной сегментации изображений на основе упрощенного условия присоединения смежных пикселей к области

Предлагается модель SRG-R параллельного выращивания областей изображения I на основе упрощенного условия присоединения смежных пикселей $i(y, x)$ к области n , учитывающего выборочное среднее значение $\bar{r}(n, m, L(n, m) - 1)$ яркости области n по маршруту $R(n, m) = \|r(n, m, l)\|_{(l=0, L(n, m)-1)}$ роста (m – номер пикселя в системе координат области n , l – номер пикселя в системе координат маршрута $R(n, m)$), связывающему граничный пиксель $r(n, m, L(n, m) - 1)$ области n , соответствующий пикселю $i(y(n, m, L(n, m) - 1), x(n, m, L(n, m) - 1))$ в системе координат изображения I , и начальный пиксель роста $r(n, m, 0)$, соответствующий пикселю $i(y(n, m, 0), x(n, m, 0))$, через последовательность из $L(n, m) - 2$ пикселей $\{r(n, m, l)\}_{(l=1, L(n, m)-2)}$, используемых для присоединения рассматриваемого граничного пикселя $r(n, m, L(n, m) - 1)$ к области n :

$$(s(y, x) = 0) \wedge (s(y(n, m, L(n, m) - 1), x(n, m, L(n, m) - 1)) = n) \wedge (n > 0) \wedge (|i(y, x) - \bar{r}(n, m, L(n, m) - 1)| < q) \Rightarrow (s(y, x) \leftarrow n) \quad (6)$$

$$\text{при } (|y - y(n, m, L(n, m) - 1)| = 1) \vee (|x - x(n, m, L(n, m) - 1)| = 1), \\ ((|y(r(n, m, l)) - y(r(n, m, l + 1))| = 1) \vee (|x(r(n, m, l)) - x(r(n, m, l + 1))| = 1)).$$

В предложенной модели SRG-R параллельного выращивания областей для связи представлений пикселя на изображении в пределах области и в маршруте роста используются три системы координат соответственно: изображения (y, x) ; области (n, m) ; маршрута роста (n, m, l) . С целью упрощения восприятия выражения (6) интенсивности пикселей в системах координат изображения и маршрута роста обозначены различными символами: i и r . При этом существует однозначное соответствие этих обозначений в соответствующих системах координат, обеспечивающее выполнение равенства $i(y(n, m, l), x(n, m, l)) = r(n, m, l)$ для любых (n, m, l) . Из выражения (6) также следует, что для каждого граничного пикселя $i(y(n, m, L(n, m) - 1), x(n, m, L(n, m) - 1))$ области существует свой маршрут роста $R(n, m)$, связывающий этот граничный пиксель с начальным пикселем $i(y(n, m, 0), x(n, m, 0))$ роста области. В качестве примера на рис. 1 приведен фрагмент полутонового изображения, на котором выделена область n , смежный с ней пиксель $i(y, x)$ и маршрут роста $R(n, m)$ длиной $L(n, m)$ пикселей (узлов), связывающий граничный пиксель m области (пиксель $i(y(n, m, L(n, m) - 1), x(n, m, L(n, m) - 1))$ в системе координат изображения – он же пиксель $r(n, m, L(n, m) - 1)$ в системе координат маршрута роста) с начальным (нулевым) пикселем роста области (пикселем $i(y(n, m, 0), x(n, m, 0))$ в системе координат изображения, т. е. пикселем $r(n, m, 0)$ в системе координат маршрута роста). Маршрут $R(n, m)$ роста представлен также в виде пути на графе, соединяющего узлы $r(n, m, 0)$ и $r(n, m, L(n, m) - 1)$ через несколько промежуточных узлов.

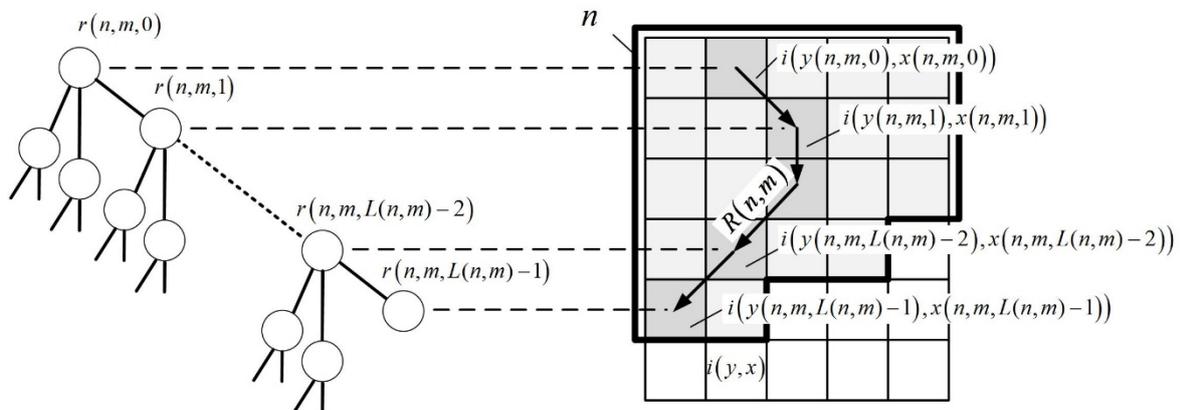


Рис. 1. Пример полутонового изображения и маршрута роста области для одного граничного пикселя
Fig. 1. An example of a grayscale image and an area growth path for one edge pixel

Выборочное среднее по маршруту роста может быть определено с помощью выражения

$$\bar{r}(n, m, L(n, m) - 1) = \frac{1}{L(n, m)} \sum_{l=0}^{L(n, m)-1} r(n, m, l). \quad (7)$$

В выражении (7) выборочное среднее пересчитывается по всему маршруту роста при каждом присоединении нового пикселя к области. Для исключения повторной выборки из памяти значений пикселей вдоль маршрута роста, снижения за счет этого вычислительной сложности и повышения эффективности распараллеливания операций предлагается использовать следующее выражение для определения выборочного среднего по маршруту роста:

$$\bar{r}(n, m, L(n, m) - 1) = \frac{\bar{r}(n, m, L(n, m) - 2) \cdot (L(n, m) - 1) + r(n, m, L(n, m) - 1)}{L(n, m)}. \quad (8)$$

В выражении (8) используется выборочное среднее $\bar{r}(n, m, L(n, m) - 2)$, полученное для предшествующего пикселя $r(n, m, L(n, m) - 2)$ в маршруте роста $R(n, m)$, для восстановления выборочной суммы $\sum_{l=0}^{L(n, m)-2} r(n, m, l)$, которая увеличивается на значение яркости текущего граничного пикселя $r(n, m, L(n, m) - 1)$. Элементы множеств $\{L(n, m)\}_{(n=0, \bar{N}, m=0, \overline{M(n)-1})}$ и $\{\bar{r}(n, m, L(n, m))\}_{(n=0, \bar{N}, m=0, \overline{M(n)-1})}$ отображаются на элементы матриц $L = \|l(y, x)\|_{(y=0, \bar{Y}-1, x=0, \bar{X}-1)}$ и $\bar{R} = \|\bar{r}(y, x)\|_{(y=0, \bar{Y}-1, x=0, \bar{X}-1)}$ так, что между ними существует однозначное соответствие.

Вычисление выборочного среднего по выражению (8) позволяет использовать одну операцию умножения и одну операцию сложения вместо $L(n, m) - 1$ операций сложения, необходимых для реализации выражения (7). Недостаток подхода на основе выражения (8) по сравнению с подходом на основе выражения (7) заключается в необходимости дополнительной памяти для хранения текущих значений $L(n, m)$ и $\bar{r}(n, m, L(n, m))$ для каждого пикселя области.

Один цикл работы элементарного вычислителя, реализующего модель SRG-R параллельного выращивания областей, состоит из следующих шагов.

Вход: S, I, L, \bar{R}, q .

Цикл 1 ($y = 0..Y - 1, x = 0..X - 1$)

Цикл 2 ($k = -1..1, p = -1..1, |k| + |p| > 0$)

Если $(s(y, x) = 0) \wedge (s(y + k, x + p) > 0) \wedge (|i(y, x) - \bar{r}(y + k, x + p)| < q)$, то

$s(y, x) \leftarrow s(y + k, x + p)$;

$L(y, x) \leftarrow L(y + k, x + p) + 1$;

$\bar{r}(y, x) \leftarrow (\bar{r}(y + k, x + p) \cdot (L(y, x) - 1) + r(y, x)) / L(y, x)$.

Конец цикла 2.

Конец цикла 1.

Выход: S, L, \bar{R} .

Оценка эффективности параллельного выращивания областей

Параллельное выращивание областей на основе выборочного среднего значения яркости области (модели SRG-W и SRG-R) обеспечивает среднее качество сегментации, определяемое ошибками локализации границ областей, по сравнению с SRG (лучшей по качеству) и простейшей SRG-S (худшей по качеству) моделями. Для оценки эффективности рассматриваемых моделей далее анализируется их вычислительная сложность для последовательной и параллельной (с ориентацией на FPGA) реализаций.

Для сегментации всех YX пикселей изображения с использованием модели SRG (1) при последовательной реализации необходимы $4YX$ ячеек памяти (буферизация исходного изображения и результата, инициализация стеков координат) и по YX операций обращения к памяти при выгрузке координат из стека, загрузке координат в стек и формировании номеров сегментов. На проверку значений смежных пикселей необходимо $8YX$ операций обращения к памяти. Больше всего операций требуется для вычисления средних яркостей сегментов. Их точное количество зависит от числа и размеров сегментов. Для приблизительной оценки числа таких операций предлагается использовать выражение $YX(1 + YX/N)/2$, учитывающее количество сегментов N , их среднюю площадь YX/N после сегментации, скорость роста области (в пределе один пиксель за итерацию) и число операций обращения к памяти на всех

YX/N итерациях роста области как сумму $YX(1+YX/N)/(2N)$ арифметической прогрессии от 1 до YX/N с шагом 1. Всего алгоритм SRG требует $11YX + YX(1+YX/N)/2$ операций обращения к памяти, из которых $YX(1+YX/N)/2$ операций, приходящихся на вычисление средних яркостей сегментов, могут быть реализованы только последовательно. Они определяют временную сложность и ограничивают эффективность распараллеливания. При параллельной реализации модели SRG необходимы $4YX$ ячеек памяти для буферизации исходного изображения и результата, хранения значений порога и средних яркостей сегментов. Таким образом, структурная $C_S(\text{SRG})$ и временная $C_T(\text{SRG})$ сложности модели SRG при параллельной реализации определяются выражениями:

$$C_S(\text{SRG}) = 4YX. \quad (9)$$

$$C_T(\text{SRG}) = YX(1+YX/N)/2. \quad (10)$$

Модель SRG-S требует $3YX$ ячеек памяти, поскольку отсутствует необходимость хранения средних значений яркости сегментов. Она позволяет сократить число операций обращения к памяти при последовательной реализации до $11YX$, а при параллельной – в среднем до YX/N . Таким образом, структурная $C_S(\text{SRG-S})$ и временная $C_T(\text{SRG-S})$ сложности модели SRG-S при параллельной реализации определяются выражениями:

$$C_S(\text{SRG-S}) = 3YX. \quad (11)$$

$$C_T(\text{SRG-S}) = YX/N. \quad (12)$$

В модели SRG-W по сравнению с моделью SRG число операций обращения к памяти сокращается до $11YX + W^2YX$. Для повышения качества сегментации размер окна W должен выбираться как можно больше, но с учетом условия $W^2YX/N < YX(1+YX/N)/(2N)$, т. е. $W^2 < (1+YX/N)/2$, поскольку W^2YX операций могут выполняться только последовательно, что ограничивает сокращение временной сложности при параллельной реализации. Таким образом, структурная $C_S(\text{SRG-W})$ и временная $C_T(\text{SRG-W})$ сложности модели SRG-W при параллельной реализации определяются выражениями:

$$C_S(\text{SRG-W}) = 4YX. \quad (13)$$

$$C_T(\text{SRG-W}) = W^2YX. \quad (14)$$

В предложенной модели SRG-R для сегментации изображения используются $2YX$ ячеек памяти (для хранения текущих значений $L(n,m)$ и $\bar{r}(n,m,L(n,m))$) сверх $3YX$ ячеек, используемых для хранения значений пикселей $i(y,x)$, номеров сегментов $s(y,x)$ и значений порога q . При этом число операций обращения к памяти по сравнению с моделью SRG-S увеличивается в 3 раза и составляет в среднем $3YX/N$. Таким образом, структурная $C_S(\text{SRG-R})$ и временная $C_T(\text{SRG-R})$ сложности модели SRG-R при параллельной реализации определяются выражениями:

$$C_S(\text{SRG-R}) = 5YX. \quad (15)$$

$$C_T(\text{SRG-R}) = 3YX/N. \quad (16)$$

Из выражений (9), (11), (13), (15) следует, что модель SRG-S имеет наименьшую пространственную сложность $3YX$, а модель SRG-R – наибольшую $5YX$ (в 1,67 раза большую по сравнению с SRG-S; в 1,25 раза большую по сравнению с SRG и SRG-W).

В табл. 1 приведены значения временной сложности, полученные по выражениям (10), (12), (14), (16) для различных моделей сегментации и изображений, содержащих различное число сегментов. Из таблицы следует, что временная сложность всех моделей уменьшается с увеличением числа сегментов, что связано с уменьшением размеров сегментов. Предложенная

модель SRG-R имеет существенно меньшую временную сложность по сравнению с моделями SRG и SRG-W (в 43690 – 44120 раз и в 10700 – 42810 раз соответственно) при проигрыше в три раза по отношению к модели SRG-S, имеющей наименьшую временную сложность.

Таблица 1. Временная сложность для различных моделей параллельной сегментации
Table 1. Time complexity for various parallel segmentation models

Параметры моделей (Model parameters)				Временная сложность моделей (Time complexity of models)			
Y	X	N	W	SRG	SRG-S	SRG-W	SRG-R
512	512	26	70	1310851072	10000	1284505600	30000
512	512	26	35	1310851072	10000	321126400	30000
512	512	262	21	131203072	1000	115605504	3000
512	512	262	15	131203072	1000	58982400	3000
512	512	2621	7	13238272	100	12845056	300
512	512	2621	5	13238272	100	6553600	300

Заключение

Предложена модель параллельного выращивания областей изображения на основе упрощенного условия присоединения смежных пикселей к области, учитывающего выборочное среднее значение яркости области, вычисляемое по маршруту роста, связывающему граничный пиксель области, соответствующий смежному присоединяемому пикселю, и начальный пиксель роста области через последовательность пикселей, используемых для присоединения рассматриваемого граничного пикселя к области. Предложенная модель имеет существенно меньшую временную сложность по сравнению с базовой и оконной моделями при проигрыше в три раза по отношению к простейшей модели, имеющей наименьшую временную сложность. Существенное уменьшение временной сложности предложенной модели по сравнению с базовой и оконной моделями достигается за счет незначительного увеличения пространственной сложности, следующего из необходимости хранения длины маршрута и суммы значений пикселей в маршруте. С учетом того, что простейшая модель обеспечивает самое низкое качество сегментации изображений из-за игнорирования средней яркости сегмента в условии присоединения нового пикселя к области, предложенная модель является наиболее эффективной для параллельной сегментации изображений, обеспечивая существенно меньшую временную и примерно эквивалентную пространственную сложность параллельной реализации по сравнению с базовой и оконной моделями.

Список литературы / References

1. Praveena M., Balaji N., Naidu C.D. FPGA implementation of high speed medical image segmentation using genetic algorithm. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2017;95(13):2981-2988.
2. Quesada-Barruso P., Heras D.B., Argüello F. Efficient GPU Asynchronous Implementation of a Watershed Algorithm Based on Cellular Automata. *IEEE 10th International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications, Leganes*. 2012: 79-86. DOI:10.1109/ISPA.2012.19.
3. Liu J., Xu L., Liu Y., [et al.]. FPGA Implementation of Region Growing-Global Inhibition Segmentation Algorithm. *International Journal of Simulation – Systems, Science & Technology*. 2016;17(24):1-9. DOI 10.5013/IJSSST.a.17.30.08.
4. Fujita T., Sawada S., Kishimoto K., [et al.]. Cellular Automaton Based Pixel Level Snakes Using Active Contour Curvature. *International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA 2017, Cancun, Mexico*. 2017: 572-575. DOI:10.34385/proc.29.C0L-B-3.
5. Saito M., Okatani T., Deguchi K. Application of the mean field methods to MRF optimization in computer vision. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Providence, RI*. 2012: 1680-1687. DOI:10.1109/CVPR.2012.6247862.
6. Thurley M.J., Danell V. Fast morphological image processing open-source extensions for GPU processing with CUDA. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2012;6(7):849-855. DOI:10.1109/JSTSP.2012.2204857.
7. Alvarado R., Tapia J.J., Rolón J.C. Medical image segmentation with deformable models on graphics processing units. *The Journal of Supercomputing*. 2013;68(1):339-364. DOI:10.1007/s11227-013-1042-4.

8. Roberts M., Packer J., Sousa M.C., [et al.]. A work-efficient GPU algorithm for level set segmentation. *Proceedings of the Conference on High Performance Graphics*. 2010: 123-132.
9. Wang C., Komodakis N., Paragios N., Markov random field modeling, inference & learning in computer vision & image understanding: a survey. *Computer Vision and Image Understanding*. 117(11):1610-1627. DOI:10.1016/j.cviu.2013.07.004.
10. Leblond A., Kauffmann C. RAIC: Robust Adaptive Image Clustering. *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2018:3678-3682. DOI: 10.1109/ICIP.2018.8451131.
11. Strzelecki M., Brylski P., Kim H. FPGA-Based System for Fast Image Segmentation Inspired by the Network of Synchronized Oscillators. *Artificial Intelligence and Soft Computing. ICAISC 2017. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham*. 2017;10245:580-590. DOI: 10.1007/978-3-319-59063-9_52.
12. Adams R., Bischof L. Seeded region growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1994;16(6):641-647. DOI: 10.1109/34.295913.
13. Fan M., Lee T.C.M. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485. DOI:10.1049/iet-ipr.2014.0490.

Сведения об авторах

Цветков В.Ю., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Tsviatkou V.Yu., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Infocommunications of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovky str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-92-96>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ CUDA

С.В. КОЗЛОВ

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

Поступила в редакцию 26 июля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Приведены особенности реализации алгоритма синтеза детальных радиолокационных изображений (РЛИ) для радиолокатора с синтезированием апертуры с использованием встроенных функций библиотеки Cuda. Дана оценка вычислительной сложности с позиций организации параллельных вычислений на графических процессорах Nvidia. Приведена оценка реальной производительности синтеза РЛИ с учетом объема и особенностей размещения первичной радиолокационной информации.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, синтез апертуры антенны, количество операций, графический процессор, время вычислений, быстрое преобразование Фурье.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Козлов С.В. Оценка производительности алгоритмов синтеза радиолокационных изображений с использованием технологии Cuda. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 92-96.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF ALGORITHMS FOR SYNTHESIZING RADAR IMAGES USING CUDA TECHNOLOGY

SERGEI V. KOZLOV

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

Submitted 26 July 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The features of the implementation of the algorithm for the synthesis of detail radar images for an aperture synthesis radar using the built-in functions of the Cuda library are presented. The estimation of computational complexity from the standpoint of the organization of parallel computing on Nvidia GPUs is given. The estimation of the real performance of radar synthesis is given, taking into account the volume and features of the placement of primary radar information.

Keywords: radar image, antenna aperture synthesis, number of operations, graphics processor, calculation time, fast Fourier transform.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kozlov S.V. Evaluation of the performance of algorithms for synthesizing radar images using Cuda technology. 2021; 19(6): 92-96.

Постановка задачи

Применяемые в радиолокаторах с синтезированием апертуры алгоритмы построения радиолокационных изображений (РЛИ) земной поверхности и расположенных на них объектов являются одними из наиболее емких в вычислительном плане для всех радиолокационных приложений. Типичный алгоритм, например, для случая однопроходной интерферометрии для радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования, при размере временного окна приема сигнала 60 мкс, частоте дискретизации 300 МГц, времени синтезирования около 2 с, периоде повторения импульсов около 5 кГц будет оперировать с около 2,5 Гбайт входных данных (при представлении отсчетов в виде чисел с плавающей точкой) с формированием пары комплексных РЛИ с различными фазовыми центрами приемной антенны типичного размера 5×5 км при разрешении около 1 м [1]. Для улучшения качества РЛИ оператор-дешифровщик может использовать различные виды аподизации по дальности и азимуту, медианное и гауссовое сглаживание и т. д. Последующая тематическая обработка включает построение интерферограммы, трудоемкую операцию «развертывания» интерферометрической фазы и вычисление высот элементов разрешения земной поверхности. Для обеспечения высокой производительности наземного центра обработки информации необходимо, чтобы указанные операции выполнялись в масштабе времени, близком к реальному, а используемые технические решения были относительно недорогими. Схожие требования имеют место для РСА авиационного базирования, где целесообразно синтезировать РЛИ на борту носителя, что позволит снизить объем бортовых накопителей и пропускную способность канала передачи данных на наземный пункт приема и обработки информации. Это побуждает к изысканию недорогих технических решений по построению РЛИ в реальном масштабе времени. Одним из возможных является использование современных графических процессоров (видеокарт), в частности, производства Nvidia. Для решения на видеокартах типовых вычислительных задач используется технология Cuda [3, 4]. Программная архитектура CUDA SDK базируется на модифицированной версии языка Си.

Цель статьи – обсуждение практических результатов и формирование рекомендаций по использованию технологии Cuda для реализации алгоритмов синтеза РЛИ.

Рассматриваемый алгоритм построения РЛИ

Для реализации на видеокартах был выбран алгоритм синтеза (рис. 1) детальных РЛИ с компенсацией миграции дальности и частоты [1], реализованный в спектральной области в варианте [2]. В скобках в блоках алгоритма указано число операций комплексного умножения и вычисления квадратного корня.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма синтеза радиолокационного изображения

Fig. 1. Block diagram of the radar image synthesis algorithm

Входными данными для алгоритма является матрица $K \times M$ комплексных отсчетов $\dot{U}_{k,m}$ принимаемой реализации, где $m = \overline{1, M}$, $M = 2^{10...13}$ – индекс времени в пределах одного периода повторения; $k = \overline{1, K}$, $K = 2^{12...14}$ – индекс периода повторения на интервале синтезирования.

Алгоритм предполагает вычисление быстрого преобразования Фурье (БПФ) по M отсчетам в K периодах повторения, коррекцию отсчетов спектров по ожидаемым параметрам взаимного перемещения РСА и участка земной поверхности для устранения миграции дальности, умножение отсчетов спектров в каждом периоде повторения на отсчеты амплитудно-фазочастотной характеристики согласованного фильтра (СФ) по дальности, вычисление обратного БПФ по «быстрому» времени и заключительную операцию БПФ по «медленному» времени с последующим переходом к квадратам модулей полученного спектра для получения амплитудного РЛИ. Матрица корректирующих коэффициентов рассчитывается предварительно и загружается из памяти.

Общее число операций комплексного умножения при однократной реализации и загрузке предварительно рассчитанной матрицы корректирующих коэффициентов оценивается величиной

$$O = 4MK(2\log_2 M + \log_2 K + 1,5) \quad (1)$$

и для типовых $M = 2^{12}$; $K = 2^{13}$ составит $O = 5,2 \cdot 10^9$ для одного интерферометрического канала на одной поляризации. Учтено (коэффициент 4), что операция комплексного умножения соответствует четырем операциям обычного умножения.

Для современных универсальных процессоров с производительностью ~ 50 GFLOPS теоретическое время расчета для указанного случая составит около 0,1 с. Однако реальная производительность из-за большого числа передачи данных между памятью и процессором, неоптимального построения вычислений и других факторов оказывается существенно ниже и составляет, например, для процессора Intel Core i7-4,2 ГГц с паспортной производительностью 30 GFLOPS, около 20...25 с, что явно не соответствует требованиям обработки в масштабе времени, близком к реальному, даже для одного приемного канала.

Особенности организации вычислений и оценка производительности видеокарт

Алгоритм синтеза РЛИ был реализован на видеокартах среднего уровня: GeForce 1050 (728 процессоров, 2 GB памяти GDDR5 на частоте 7 ГГц) и GeForce 1660ti (1024 процессоров, 6 GB, GDDR5 на частоте 3 ГГц). Для расчета БПФ и ОБПФ использовалась оптимизированная библиотека CUFFT [3]. Весь алгоритм реализовывался на видеокarte, для чего массив отсчетов сигналов загружался из памяти хоста в память видеокарты, и с использованием функций Cuda организовывались вычисления согласно рис. 1. Рассматривались два варианта обработки – когда все исходные/рассчитываемые массивы хранились в памяти и когда исходные массивы (более не нужные) замещались рассчитываемым. Дополнительно оценивалось быстроедействие в зависимости от числа задаваемых нитей (поток) [3]. Время выполнения фиксировалось средствами Windows при усреднении по достаточному числу реализаций. Параметры реализации алгоритма обработки (t – время выполнения, S – реальная производительность, P – объем задействованной памяти видеокарты в мегабайтах) при $M = 4096$ и частоте повторения импульсов 5 кГц приведены в табл. 1. Прочерки в соответствующих клетках таблицы свидетельствуют о невозможности реализации алгоритма обработки в полном объеме (без разделения на части и участия центрального процессора) из-за ограничений по объему памяти видеокарты.

Из результатов табл. 1 следует: время синтеза РЛИ для одного канала в 4...5 раз меньше времени наблюдения, т. е. обработка для двух интерферометрических приемных каналов и на двух поляризациях возможна в реальном масштабе времени; ускорение обработки на видеокартах в сравнении с процессором Intel Core i7 достигает в 50...150 раз; реальная производительность видеокарт при синтезе РЛИ составляет 6,0...7,7 GFLOPS и 14,1...20,5 GFLOPS, при этом время вычисления БПФ/ОБПФ соизмеримо с указанным в [4]; реальная производительность не зависит от числа задаваемых нитей (поток) и ограничена, в основном, пропускной способностью памяти видеокарты; при сокращении объема используемой памяти за счет замещения массивов производительность в зависимости от быстрогодействия памяти может увеличиваться до 30 %; увеличение числа физических процессоров в графическом процессоре приводит к примерно пропорциональному увеличению производительности.

Таблица 1. Параметры реализации алгоритма синтеза РЛИ на видеокартах при хранении / замещении использованных данных в памяти

Table 1. Parameters of the implementation of the radar image synthesis algorithm on video cards when storing / replacing used data in memory

Число периодов повторения K / время синтеза, с Number of repetition periods K / synthesis time, c	Видеокарта GeForce 1050 GeForce 1050 video card			GeForce 1660ti GeForce 1660ti video card		
	t , c	S , GFLOPS	P , Mb	t , c	S , GFLOPS	P , Mb
1024 / 0,16	0,053 / 0,055	6,8 / 6,6	665 / 583	0,025 / 0,20	14,4 / 17,8	1408 / 1325
2048 / 0,33	0,11 / 0,11	7,0 / 7,1	895 / 731	0,054 / 0,045	14,1 / 17,2	1638 / 1473
4096 / 0,66	0,223 / 0,220	7,2 / 7,3	1365 / 1027	0,113 / 0,095	14,3 / 16,1	2098 / 1769
8192 / 1,3	- / 0,44	- / 7,7	- / 1719	0,22 / 0,188	15,0 / 18,0	3020 / 2361
16384 / 2,6	- / -	- / -	- / -	0,454 / 0,365	15,6 / 19,4	4864 / 3549

Кроме того, установлено, что объем задействованной компилятором памяти видеокарты оказывается в 2...3 раза больше объема исходных данных и результатов вычислений при несущественных затратах памяти на хранение промежуточных переменных. Это обстоятельство является существенным при выборе видеокарты и объясняется, по-видимому, особенностями размещения и адресации больших массивов данных в памяти видеокарты при их совместной параллельной обработке физическими процессорами.

Для преодоления ограничений по быстродействию памяти видеокарты дополнительно рассматривался вариант обработки, когда при выполнении БПФ / ОБПФ загрузка исходных данных и считывание результатов осуществлялось отдельными частями под управлением центрального процессора. Установлено, что это приводит (несмотря на дополнительные затраты времени на пересылку данных в/из видеокарты) к существенному ускорению вычислений. Оптимизируемым является размер блока данных, который может определяться экспериментально для каждого типа видеокарты. Так, при выполнении БПФ по медленному времени (рис. 1) для рассматриваемых видеокарт оптимальным оказалось деление $M = 4096$ отсчетов по быстрому времени на блоки размером $M_1 = 128; 256$ или 512 отсчетов (в зависимости от K). Это приводило к ускорению вычислений до трех раз, но сопровождалось дополнительной загрузкой центрального процессора.

Выводы

Реализация синтеза радиолокационных изображений с использованием современных видеокарт и технологии Cuda является одним из наиболее гибких и дешевых технических решений в этой области. Полученные результаты позволяют оценивать производительность и обоснованно выбирать технические средства для синтеза РЛИ в реальном масштабе времени, в том числе для обработки на борту носителя радиолокатора с синтезированием апертуры.

Список литературы

1. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. *Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса*. Москва: Техносфера; 2019.
2. Козлов С.В., Ле В.К. Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области. *Доклады БГУИР*. 2021;19(5):35-44.
3. Сандерс Дж., Кэндрот Э. *Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров*. Москва: ДМК-Пресс; 2011.
4. Пантелеев А.Ю. Цифровая обработка сигналов на современных графических процессорах. *Цифровая обработка сигналов*. 2012;3:68-75.

References

1. Gruzдов V.V., Kolkovskij Yu.V., Krishtopov A.V., Kudrya A.I. [*New technologies for remote sensing of the Earth from space*]. Moscow: Technosphere; 2019. (In Russ.)
2. Kozlov S.V., Le V.K. [Algorithms for long-term coherent accumulation of the reflected signal with non-zero higher derivatives of the range to the radar target in the spectral region]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(5):35-44. (In Russ.)
3. Sanders J., Candrot E. [*CUDA technology in examples: An introduction to GPU programming*]. Moscow: DMK-Press; 2011. (In Russ.)
4. Panteleev A.Yu. [Digital signal processing on modern graphics processors]. *Digital signal processing*. 2012;3:68-75. (In Russ.)

Сведения об авторах

Козлов С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры информационных радиотехнологий 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. +375-17-293-89-11;
e-mail: kozlov@bsuir.by
Козлов Сергей Вячеславович

Information about the authors

Kozlov S.V., D.Sc., Associate professor, Professor at the Information Radioengineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-89-11;
e-mail: kozlov@bsuir.by
Kozlov Sergei Vyacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-97-102>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.52

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИСПОСОБЛЯЮЩИХСЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Г.Т. КУЛАКОВ, А.Т. КУЛАКОВ

Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 28 июня 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Освещаются вопросы существенного улучшения качества управления объектами с самовыравниванием с использованием двухконтурных систем автоматического управления (САУ). Приведены результаты моделирования и промышленных испытаний типовой системы автоматического управления и предлагаемой инвариантной каскадной САУ. Обоснованы преимущества методов структурно-параметрической оптимизации для создания высококачественных систем управления теплоэнергетическими процессами. Предложен следующий алгоритм формирования структурной схемы высококачественной инвариантной каскадной САУ. Вначале определяют структуру оптимальной передаточной функции стабилизирующего регулятора как произведения обратной передаточной функции опережающего участка объекта на заданную передаточную функцию разомкнутой системы внутреннего контура в виде идеального интегрирующего звена с одним расчетным параметром динамической настройки, позволяющим оптимально обрабатывать как внутренние возмущения, так и задание стабилизирующему регулятору. Затем рассчитывают параметры динамической настройки корректирующего регулятора на оптимальную обработку крайнего внешнего возмущения. Далее выделяют эквивалентное внешнее возмущение без его непосредственного измерения с использованием полной модели инерционного участка объекта. При этом полученную разность основной регулируемой величины и выхода модели подают на вход устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, реализованного в виде дифференциатора, что позволяет повысить точность и быстродействие инвариантной САУ по сравнению с типовой. Для обеспечения высокого качества регулирования во всем диапазоне изменения нагрузок параметры динамической настройки инвариантной каскадной САУ и модели инерционного участка корректируют в функции нагрузки.

Ключевые слова: системы управления, высокое качество, инвариантность, модели объекта и систем, структурно-параметрическая оптимизация, переменная динамика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т. Основные принципы построения высококачественных аналитических приспособляющихся систем управления теплоэнергетическими процессами. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 97-102.

BASIC PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF HIGH-QUALITY ANALYTICAL ADAPTABLE CONTROL SYSTEMS FOR THERMAL ENERGY PROCESSES

GENADZI T. KULAKOU, ALIAKSANDR T. KULAKOU

Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 28 June 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The modeling results and industrial tests of a typical automatic control system (ACS) and the proposed invariant cascade ACS are presented. The advantages of structural-parametric optimization methods for creating high-quality control systems for heat-and-power processes have been substantiated. The following algorithm for forming a block diagram of a high-quality invariant cascade SAR is proposed. At the beginning, the structure of the optimal transfer function of the stabilizing regulator is determined as the product of the inverse transfer function of the leading section of the object by a given transfer function of the open system of the internal circuit in the form of an ideal integrating link with one calculated parameter of dynamic tuning, which allows optimally working out both internal disturbances and the task of the stabilizing regulator. Then, the parameters of the dynamic adjustment of the corrective regulator are calculated for optimal processing of the extreme external disturbance. Next, an equivalent external perturbation is isolated without its direct measurement using a complete model of the inertial section of the object. At the same time, the obtained difference between the main adjustable value and the model output is fed to the input of an equivalent external perturbation compensation device implemented in the form of a differentiator, which makes it possible to increase the accuracy and speed of the invariant SAR compared to the standard one. To ensure high quality control over the entire range of load changes, the parameters of the dynamic adjustment of the invariant SAR and the model of the inertial section are adjusted in the load function.

Keywords: control systems, high quality, invariance, object and system models, structural-parametric optimization, variable dynamics.

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

For citation. Kulakou G.T., Kulakou A.T. Basic principles of construction of high-quality analytical adaptable control systems for thermal energy processes. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 97-102.

Основной проблемой внедрения современных систем автоматического управления тепловых электрических станций (ТЭС) и атомных электрических станций (АЭС) является обеспечение высокого качества их функционирования в переменных режимах [1].

В аналитических системах автоматического управления (САУ) контролируемые изменения динамических характеристик теплоэнергетических объектов по каналу управляющих воздействий зависят от уровня нагрузки. Эти изменения можно вычислять заранее и с помощью устройств коррекции параметров динамической настройки системы автоматически их корректировать в функции нагрузки по вычисленным нелинейным зависимостям, сохраняя высокое качество регулирования в рабочем диапазоне изменения нагрузок, т. е. приспосабливать САУ к изменениям динамических характеристик объектов управления [2].

При построении оптимальных и адаптивных систем управления широко применяют как модели объектов, так и системы в целом, например, при обработке скачка задания [3].

В работах [4–6] для построения высококачественных структур САУ используется обратная передаточная функция модели объекта, реализованная в структуре оптимальных регуляторов, и модель замкнутой системы в качестве критерия оптимальной обработки задания. При этом структура и параметры модели системы должны полностью соответствовать структуре и параметрам модели объекта. При выполнении этих условий процессы в реальной системе при обработке задания будут не приближаться к модели-эталону, а точно ей следовать. В этих же работах приведены методы структурно-параметрической оптимизации как типовых двухконтурных САУ, так и инвариантных по отношению как к наиболее опасным внутренним,

так и внешним возмущениям. В работах [7–9] приведены различные варианты структурных схем инвариантных САУ, в том числе с использованием передаточных функций оптимальных регуляторов как для объектов с самовыравниванием, так и для объектов без самовыравнивания.

Для построения инвариантных САУ по отношению к внешним неизмеряемым возмущающим воздействиям используются полные модели инерционных или главных участков объекта управления, которые формируют параллельно реальным участкам, а разницу между текущими значениями выхода системы и полной модели объекта используют для коррекции задания основному или корректирующему регулятору с помощью устройства выделения внешнего возмущения, реализуя систему управления с нулевой чувствительностью к изменениям динамических характеристик объекта [3].

На рис. 1 приведены схемы моделирования переходных процессов формирования трапецеидальных возмущающих воздействий с выхода автоматического задатчика электрической мощности энергоблока (рис. 1, а), предлагаемой инвариантной системы автоматического управления (рис. 1, б) и типовой двухконтурной САУ с дифференциатором первого впрыска котла ТГМП-114 Лукомльской ГРЭС (ЛГРЭС) (рис. 1, с). При этом структура и настройка стабилизирующего регулятора выбиралась с использованием передаточной функции оптимального регулятора [9], а корректирующего регулятора – по методу полной компенсации большей постоянной времени объекта [4]. Модель инерционного участка представлена инерционным звеном второго порядка с запаздыванием, а устройство компенсации внешнего возмущения реализовано в виде дифференциатора, настройки которого рассчитывают с учетом заданной модели отработки задания корректирующим регулятором [1].

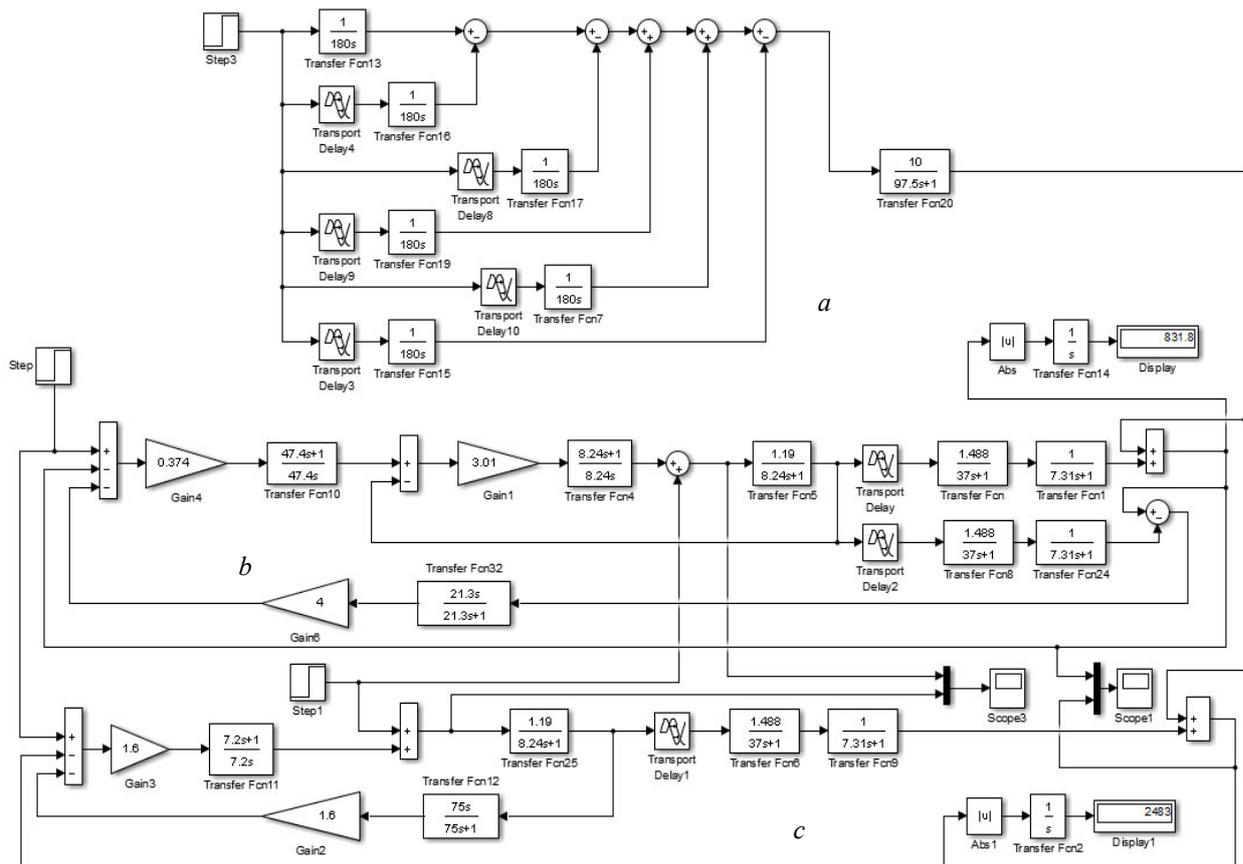


Рис. 1. Структурные схемы моделирования переходных процессов: формирователя трапецеидальных внешних возмущений (а); инвариантной САУ (б); типовой САУ с дифференциатором Лукомльской ГРЭС (с)
Fig. 1. Functional block diagrams for modeling transient processes: generator of trapezoidal external disturbances (a); invariant ACS (b); typical ACS with differentiator of Lukoml state district power station (c)

На рис. 2 приведены графики переходных процессов САУ при обработке скачка задания $y, x_{3д}$ корректирующему регулятору, внутренних возмущений y, f_1 , внешних трапецеидальных возмущений y, f_2^T , а также скачкообразных внешних возмущений $y, f_2^{СК}$. При этом пунктирные линии соответствуют типовой САУ с дифференциатором, а жирные – инвариантной САУ.

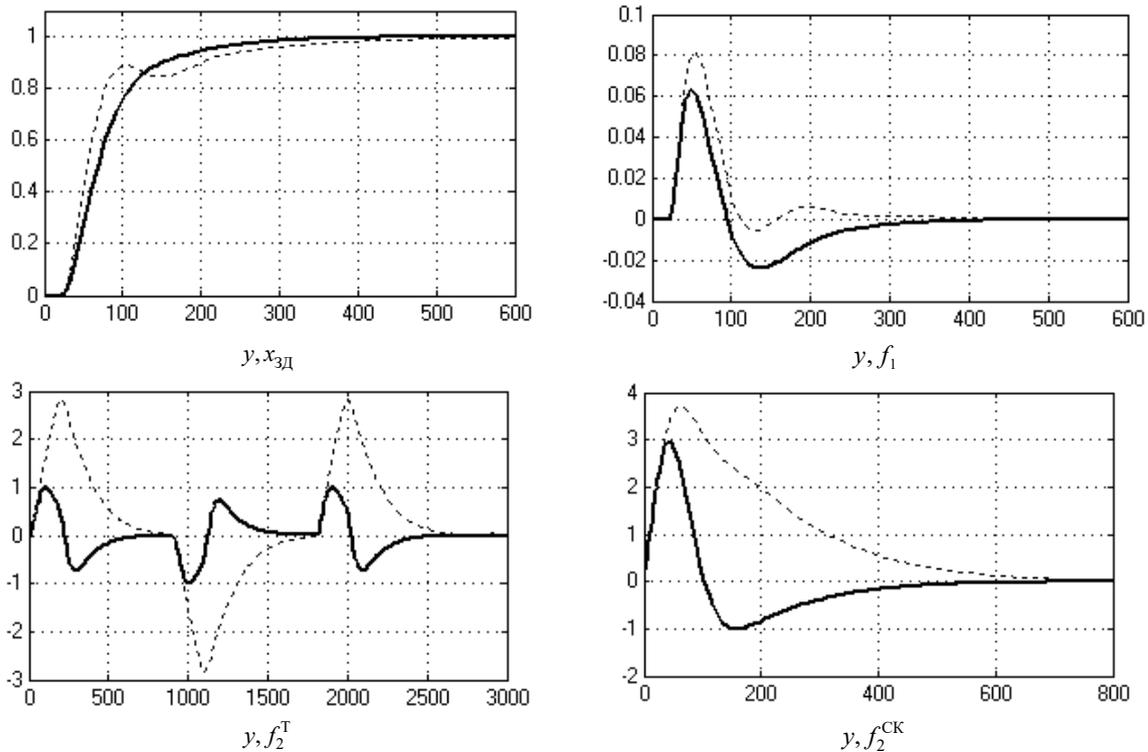


Рис. 2. Графики переходных процессов в типовой САУ ЛГРЭС и инвариантной каскадной САУ при отработке: скачка задания $y, x_{3д}$; внутреннего возмущения y, f_1 ; внешнего трапецеидального возмущения y, f_2^T ; внешнего скачкообразного возмущения $y, f_2^{СК}$

Fig. 2. Graphs of transient processes in a common automatic control system of Lukoml power station and an invariant cascade automatic control system during work: Desired and Actual response (InPut/OutPut) $y, x_{3д}$; internal disturbance y, f_1 , external trapezoidal disturbance y, f_2 ; external step disturbance y, f_2

Из графиков переходных процессов (рис. 2) следует, что время отработки задания инвариантной САУ по сравнению со штатной САУ ЛГРЭС уменьшилось в 1,5 раза, а графики переходных процессов по результатам моделирования и эксплуатационных испытаний практически совпадают.

Максимальная динамическая ошибка при отработке внутренних возмущений y, f_1 инвариантной САУ уменьшилась в 1,3 раза по сравнению со штатной САУ ЛГРЭС. При этом интегральная оценка по модулю ошибки регулируемой величины уменьшилась на 12 %.

При отработке трапецеидальных внешних возмущений y, f_2^T максимальная динамическая ошибка регулирования и интегральная оценка по модулю ошибки регулирования уменьшилась в 3 раза по сравнению с типовой САУ ЛГРЭС. При отработке скачка внешнего возмущения интегральная оценка по модулю уменьшилась по сравнению типовой САУ в 2,3 раза, а максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшилась на 20 %.

По результатам промышленных испытаний и моделирования было установлено, что время регулирования инвариантной каскадной САУ, а также дисперсия ошибки регулирования в 2 раза меньше, чем у типовой САУ. Это позволяет рекомендовать инвариантные каскадные системы автоматического управления для широкого внедрения на тепловых электрических станциях ГПО «Белэнерго».

Список литературы

1. Кулаков Г.Т. Структурно-параметрическая оптимизация динамических систем теплоэнергетических *Vyshejschaya shkola* процессов ТЭС и АЭС. *Доклады БГУИР*. 2015;2(88):144-147.
2. Хутский Г.И., Кулаков Г.Т. Системы автоматического регулирования температуры перегретого пара с устройством коррекции параметров динамической настройки. *Теплоэнергетика*. 1968;3:37-41.
3. Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е. *Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами*. Москва: Энергия; 1973.
4. Кулаков Г.Т. *Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справочное пособие*. Минск: Вышэйшая школа; 1984.
5. Кулаков Г.Т. *Анализ и синтез систем автоматического регулирования*. Минск: Технопринт; 2003.
6. Кузьмицкий И.Ф., Кулаков Г.Т. *Теория автоматического управления: учебное пособие*. Минск: БГТУ; 2006.
7. Кузьмицкий И.Ф., Кулаков Г.Т. *Теория автоматического управления: учебник для вузов*. Минск: БГТУ; 2010.
8. Кулаков Г.Т. *Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие*. Минск: Вышэйшая школа; 2017.

References

1. Kulakov G.T. [Structural-parametric optimization of dynamic systems of thermal power processes of thermal power plants and nuclear power plants]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2015;2(88):144-147. (In Russ.)
2. Khutsky G.I., Kulakov G.T. [Systems of automatic temperature control of superheated steam with a device for correcting dynamic adjustment parameters]. *Teploenergetika*. 1968;3:37-41. (In Russ.)
3. Alexandrovsky N.M., Egorov S.V., Kuzin R.E. [Adaptive automatic control systems for complex technological processes]. Moscow: Energia; 1973. (In Russ.)
4. Kulakov G.T. [*Inzhenernye ekspress-metody rascheta promyshlennyh sistem regulirovaniya: spravochnoe posobie*]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 1984. (In Russ.)
5. Kulakov G.T. [*Analysis and synthesis of automatic control systems*]. Minsk: Technoprint; 2003.
6. Kuzmitsky I.F., Kulakov G.T. [*Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie*]. Minsk: BSTU; 2006. (In Russ.)
7. Kuzmitsky I.F., Kulakov G.T. [*Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya vuzov*]. Minsk: BSTU; 2010. (In Russ.)
8. Kulakov G.T. [*Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi processami: uchebnoe posobie*]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 2017. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи. / All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Кулаков Г.Т., д.т.н., профессор, профессор Белорусского национального технического университета.

Кулаков А.Т., к.т.н., доцент, доцент Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Kulakov G.T., D.Sc, Professor, Professor of Belarusian National Technical University.

Kulakov A.T., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет;
тел. 8-017-293-91-45; +375-29-693-70-27;
e-mail: tes_bntu@tut.by
Кулаков Геннадий Тихонович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 65,
Belarusian National Technical
University;
tel. 8-017-293-91-45; +375-29-693-70-27;
e-mail: tes_bntu@tut.by
Kulakov Genadzi Tikhonovich

