



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-7-99-105>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.315.593:539.216.2

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ

А.С. СТРОГОВА

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

Поступила в редакцию 23 сентября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Исследовались закономерности изменения концентрации электрически активной легирующей примеси в пленке наноструктурированного кремния, путем изменения удельного электрического сопротивления в зависимости от условий легирования. Определены зависимости изменения полученных структур, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), такими как La, Eu, Sm, Dy, Gd (лантаноиды), на наноструктурированных пленках кремния. Установлены закономерности изменения полученных пленок и изменение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) в зависимости от условий формирования. Показаны закономерности изменения ТКС в зависимости от выбранных условий легирования или нелегирования различными примесями наноструктурированных пленок кремния. Показано, что основными условиями, при которых показано воздействие и изменение температурного коэффициента сопротивления резисторов на тонких пленках с использованием РЗЭ, таких как кислород, бор и фосфор, в объеме пленки, считается температурное влияние уже после осаждения.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, наноструктурированные пленки, имплантация, деформация, температурный коэффициент сопротивления.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Выражается благодарность к.т.н., доценту Ковалевскому А.А. за совместно проведенную работу и рекомендации по развитию научного направления. Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант № 20-3160).

Для цитирования. Строгова А.С. Температурный коэффициент сопротивления легированных редкоземельными элементами наноструктурированных пленок кремния. Доклады БГУИР. 2021; 19(7): 99-105.

TEMPERATURE RESISTANCE COEFFICIENT OF DOPED WITH RARE EARTH ELEMENTS NANOSTRUCTURED SILICON FILMS

ALIAKSANDRA S. STROGOVA

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

Submitted 23 September 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The regularities of changes in the concentration of an electrically active dopant in a nanostructured silicon film by changing the electrical resistivity depending on the doping conditions were investigated. The dependences of the changes in the obtained structures doped with rare-earth elements, such as La, Eu, Sm, Dy, Gd (lanthanides), on nanostructured silicon films are determined. The regularities of the obtained films changes and the temperature coefficient of resistance (TCR) change depending on the formation conditions are established. The regularities of the TCR are shown depending on the selected conditions for doping or non-doping of nanostructured silicon films with various impurities. It is shown that the main conditions under which the effect and change in the temperature coefficient of resistors resistance on thin films using rare-earth elements, such as oxygen, boron and phosphorus in the bulk of the film, is considered to be the temperature effect after deposition.

Keywords: rare-earth elements, nanostructured films, implantation, deformation, temperature coefficient of resistance.

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

Gratitude. Thanks to PhD, Associate Professor Kovalevsky A.A. for the joint work and recommendations for the development of the scientific direction. The work is carried out with the support of the Ministry of Education (Grant No. 20-3160).

For citation. Strogova A.S. Temperature resistance coefficient of doped with rare earth elements nanostructured silicon films. Doklady BGUIR. 2021; 19(7): 99-105.

Введение

В настоящее время возникает необходимость провести более глубокое изучение и анализ полупроводниковых материалов для улучшения параметров, свойств и характеристик в области электроники для создания более перспективных и улучшенных материалов [1–6].

Особое внимание вызывают гетерокомпозиции на основе Si, Ge и их твердых растворов с использованием полупроводников с различными электрофизическими характеристиками [1–6]. Гетерокомпозиции на основе Ge и Si – крайне востребованный материал для электронной техники с новыми возможностями при получении микроэлектронных компонентов, что обусловлено физическими свойствами, такими как, например, деформационный эффект, и совместимостью их технологии [6–9] с обычной кремниевой технологией [1–4, 5]. Причиной деформационных эффектов является смещение энергетических уровней полупроводника при действии деформации и связанное с этим изменение энергетического спектра носителей заряда – электронов и дырок в зависимости от деформации [6].

Создание стабильных высокоомных ($\geq 10^5$ Ом·м) тонких пленок остается важной проблемой в технологии интегральной микроэлектроники, гибридных схем и высоковольтных полупроводниковых приборов [6]. Устойчивое совершенство полупроводниковых приборов вызывает необходимость улучшения их характеристик. Это достигается как за счет изменения старых конструкций в целом, так и за счет применения новых материалов с учетом их специфических физических эффектов [7–9]. Поэтому одним из актуальных направлений является изучение методов целенаправленного управления энергетическим спектром и явлениями переноса носителей заряда, а также применение многослойных напряженных гетероэпитаксиальных структур. В таких структурах наблюдается изменение спектра носителей заряда из-за наличия эффектов размерного квантования и влияние на спектр собственных упругих напряжений в слоях гетеросистемы. Размер кристаллитов и толщина слоев в наноструктурированных гетеросистемах дает возможность формировать структуры с управляемыми характеристиками для применения в микро- и наносистемной технике [6, 7–9].

Цель настоящей работы – изучение закономерности изменения концентрации электрически активной примеси, удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента сопротивления в наноструктурированных пленках кремния, легированных

редкоземельными элементами, от условий легирования с учетом величины упругой энергии атомов редкоземельных элементов.

Методика проведения эксперимента

Осаждение, легирование и исследование электрофизических свойств наноструктурированных пленок кремния, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), от условий легирования проводилось по методике, изложенной в [10–13]. В данном исследовании изучены закономерности изменения концентрации электрически активной примеси, удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) в пленках наноструктурированного кремния, легированных РЗЭ, от условий легирования [14].

В результате проведенных исследований установлено, что влияние примесей редкоземельных элементов-лантаноидов на свойства тонких (0,5–2,0 мкм) пленок наноструктурированного кремния (НСК) определяется положением атомов или ионов лантаноидов в решетке кремния и тем, какое взаимодействие на эту решетку они оказывают [15]. Так как атомы и ионы лантаноидов имеют больший размер по сравнению с атомами и ионами кремния, они вызывают деформацию кристаллической решетки кремния в пленках НСК. Эта деформация определяется величиной упругой энергии лантаноидов в решетке кремния [15].

Упругость энергии лантаноидов в решетке кремния оценивали согласно теории подвижных границ [11–13]. В этом случае нейтральные атомы и ионы лантаноидов в кремнии рассматриваются как блок монокристаллов, среда подвижных границ считается сплошной и используется решение задачи Ламе для упругой сферической оболочки:

$$E_{el} = [8\pi E / (1 + \mu)] (1/R) [R^3 (R/4 - R_0/3) + R_0^4 / 12],$$

где E_{el} – упругая энергия нейтральных атомов или ионов лантаноидов, эВ; E – модуль Юнга для кремния; μ – коэффициент Пуассона для кремния; R – радиус атома или иона лантаноида; R_0 – радиус междоузлия решетки кремния.

Рассчитанные значения E_{el} как для атомов, так и для ионов лантаноидов, от иттрия до лютеция, находящихся в тетраэдрических междоузлиях кремния, составляют 2,6 – 3,2 эВ. Такое большое значение упругой энергии и позволяет предположить, что атомы (ионы) лантаноидов вызывают в решетке кремния деформацию растяжения. В результате происходит увеличение радиуса решетки от R_0 до R , что обуславливает деформации несоответствия, вызывает высокую плотность дислокаций по границам зёрен в пленках НСК, разориентацию кристаллитов. Более того, их внедрение вызывает локальные разрывы в объеме нанокристаллов пленки НСК, снижает сплошность и локализует преимущественный рост отдельных nanoостровков (рис. 1). В результате все эти эффекты способствуют снижению плотности пленки НСК. Это представляет несомненный интерес при изучении механизма внедрения легирующих примесей в пленки НСК [4, 11, 13].

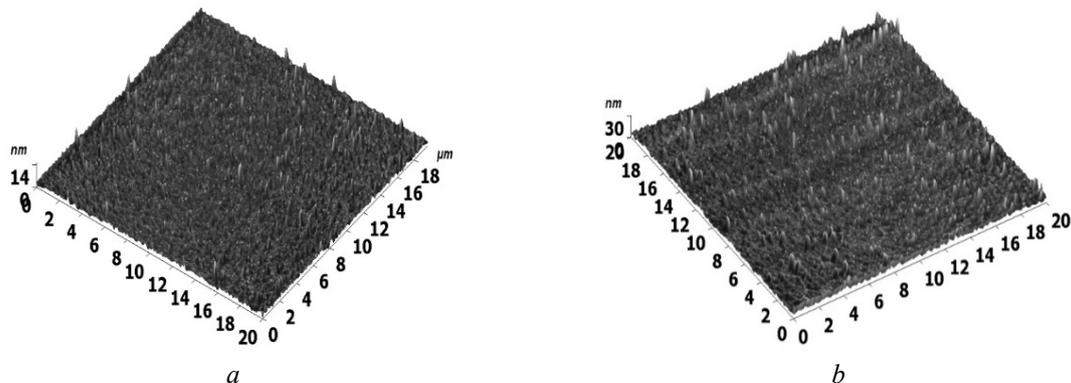


Рис. 1. Топография рельефа поверхности пленок НСК, легированных La (a) и Eu (b)
Fig. 1. Topography of the surface relief of NSS films doped with La (a) and Eu (b)

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 2 приведены закономерности изменения объемной концентрации В, Ga и Eu в НСК в зависимости от величины тока разряда (*a*), расстояния между электродами (*b*) и расхода водорода через разрядник (*c*). Кривые (рис. 2, *a*) свидетельствуют о том, что при введении в пленки НСК В, Ga и Eu методом газоразрядного легирования при величине токов 3–10 мА в плазме газового разряда происходит увеличение объемной концентрации электрически активной примеси. Это обусловлено интенсификацией взаимодействия ионов водорода в плазме газового разряда. В результате такого взаимодействия происходит образование гидридов В, Ga, Eu и перенос их в зону зарождения и роста пленки НСК.

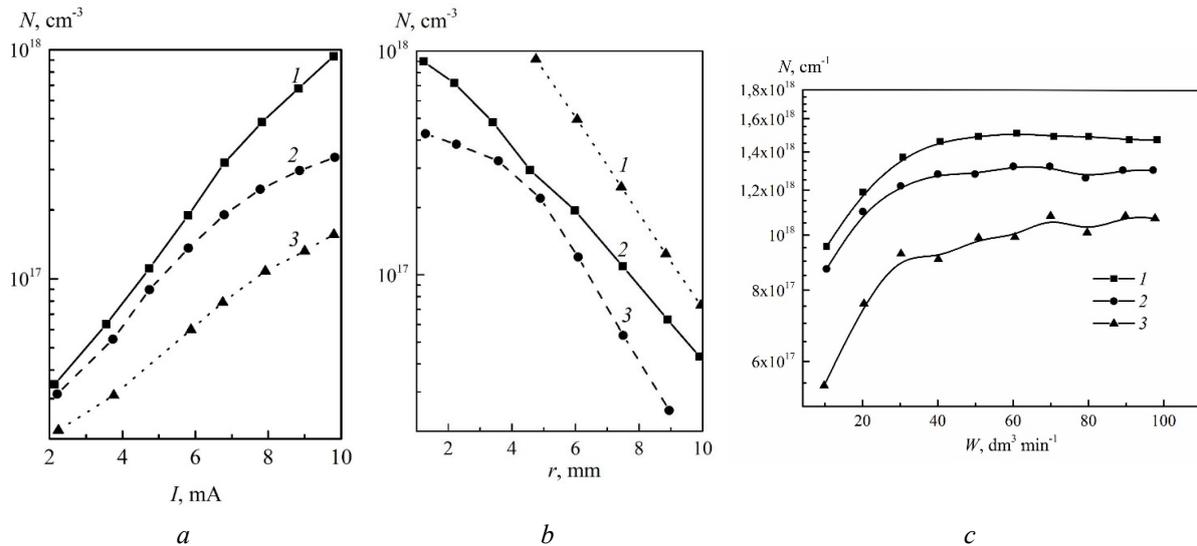


Рис. 2. Закономерности изменения концентрации электрически активной легирующей примеси в пленке НСК от условий газоразрядного легирования – электроды LaB₆ (1), Ga (2), Eu (3): *a* – (1, 3), $L = 4$ мм; (2) $L = 3,5$ мм; (1, 2) $W = 10 \text{ дм}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$; (3) $W = 30 \text{ дм}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$; *b* – (1, 2) $W = 10 \text{ дм}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$; (3) $W = 30 \text{ дм}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$; (1–3) $I = 10$ мА; *c* – (1, 3) $L = 4$ мм; (2) $L = 3,5$ мм

Fig. 2. Dependences of the concentration of dopant in the NSS film on the conditions of gas-discharge doping – electrodes (1) LaB₆, (2) Ga, (3) Eu: *a* – (1, 3) $L = 4$ mm; (2) $L = 3.5$ mm; (1, 2) $W = 10 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; (3) $W = 30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; *b* – (1, 2) $W = 10 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; (3) $W = 30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; (1–3) $I = 10$ mA; *c* – (1, 3) $L = 4$ mm; (2) $L = 3.5$ mm

При токе разряда ≤ 10 мА степень внедрения в НСК В, Ga и Eu пропорциональна количеству генерируемых в газоразрядном реакторе гидридов и зависит от расстояния между электродами (рис. 2, *b*), незначительно изменяясь с увеличением потока водорода через разрядник (рис. 2, *c*). С уменьшением расстояния между электродами, независимо от скорости потока водорода, происходит увеличение объемной концентраций электрически активной примеси в пленке НСК [4]. Причем при расстоянии между электродами 3,5 мм область насыщения наблюдается только для Eu и Ga. Повышение степени легирования НСК с уменьшением расстояния между электродами, по-видимому, обусловлено тем, что при этих условиях происходит более эффективный электрический разряд. Он усиливает перенос из электродов ионов легирующей примеси, которые взаимодействуют с водородом с образованием гидридов [4]. Образовавшиеся гидриды поставляются к растущим слоям НСК. Факт образования гидридов из гексаборида лантана, галлия и европия как электродов подтверждается тем, что при пропускании через разрядник аргона вместо водорода процесс внедрения В, Ga и Eu в НСК не происходит. Это обусловлено сменой механизма испарения и поставки материала в зону формирования пленки НСК. По всей видимости, при использовании таких электродов, как гексаборид лантана, галлий и европий, в плазме газового разряда происходит разрушение химических соединений с образованием гидридов акцепторной примеси.

Дополнительные исследования показали, что удельное электрическое сопротивление (Ω) пленок НСК, легированных кислородом и лантаноидами, во многом обусловлено концентрацией кислорода в газовой смеси, температурой подложки, ионным

радиусом лантаноида и последующим лазерным отжигом пленок. Экспериментально установлено, что Ω пленок НСК уменьшается с повышением концентрации SiH_4 в газовой смеси, температуры подложки и с уменьшением химического сродства лантаноида к кислороду, а увеличивается с повышением концентрации кислорода в газовой смеси (рис. 3, а). При повышении содержания кислорода в газовой смеси в пленках НСК размеры включений оксида кремния увеличиваются. Особенно это характерно для пленок НСК, легированных лантаноидами с высоким сродством к кислороду, например, Sm и Dy.

Изменение Ω во всех рассмотренных случаях (см. рис. 3), по сравнению с пленками НСК без РЗЭ [4], происходит именно за счет введения лантаноидов. Из рассмотренных лантаноидов наиболее заметный вклад в изменение Ω вносят Sm и Gd. По-видимому, это следствие высокого сродства их к водороду, углекислому газу и кислороду, в результате которого образование гидридов термодинамически наиболее предпочтительно [4]. В результате возможно создание полуизолирующих, наноструктурированных пленок с управляемой величиной удельного электрического сопротивления.

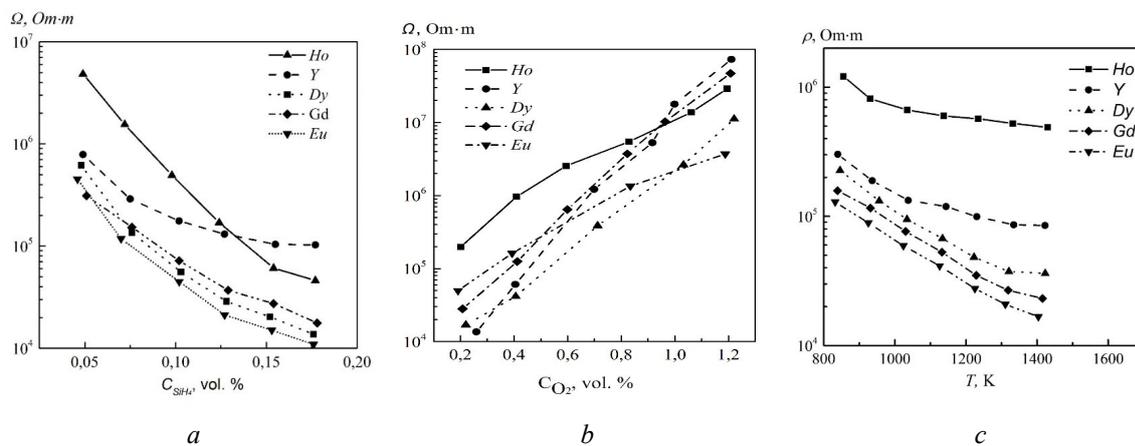


Рис. 3. Закономерности изменения Ω пленок НСК в зависимости от: концентрации моносилана (а); концентрации кислорода (b); температуры процесса (c) при осаждении CVD-методом. Легировующие компоненты: Ho, Y, Dy, Gd, Eu, кривые 1–5 соответственно

Fig. 3. Change in Ω of NSS films depending on: the concentration of monosilan (a); the concentration of oxygen (b); process temperature (c) during CVD-deposition. Alloying components: Ho, Y, Dy, Gd, Eu, curves 1–5 respectively

Применение исследуемых пленок НСК позволяет подойти по-новому к решению проблемы точной подгонки диффузионных резисторов, созданию затворных электродов, мелких эмиттерных областей, межкомпонентной изоляции и пассивации изделий электронной техники.

На рис. 4 приведена температурная зависимость отклонения изменения сопротивления поликремниевых резисторов, сформированных на различных по составу пленках НСК. С увеличением температуры термообработки пленок НСК от 523 до 773 К отклонения сопротивления от начального уменьшаются.

Проведенные исследования позволили установить общность и различие в закономерностях изменения ТКС пленок НСК, легированных различными примесями. Установлено, что ТКС пленок НСК, легированных лантаноидами, с повышением температуры подложки увеличивается в сторону отрицательных значений. Это обусловлено тем, что лантаноиды вступают в химическое взаимодействие с целым рядом неметаллических примесей и переводят их в электрически неактивные компоненты. Возможно образование более легких, чем кремний, комплексов, которые могут уноситься газовым потоком из зоны взаимодействия. Так как основной причиной перераспределения примеси является послеимплантационный отжиг (диффузия), то этот эффект подавляется снижением температуры или уменьшением времени отжига при высокой температуре, в результате чего предоставляется возможность управлять величиной и стабильностью положительного ТКС.

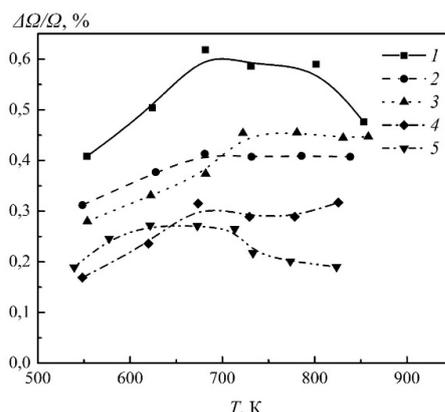


Рис. 4. Температурная зависимость отклонения (T) изменения сопротивления поликремниевых резисторов ($\Delta\Omega/\Omega$), сформированных на различных по составу пленках НСК: 1 – НСК нелегированный; 2 – НСК+Ga; 3 – НСК+Eu; 4 – НСК+O₂+Gd; 5 – НСК + Eu

Fig. 4. Temperature dependence of the deviation (T) of the change in the resistance of polysilicon resistors ($\Delta\Omega/\Omega$) formed on NSS films of different composition: 1 – undoped NSS; 2 – NSS + Ga; 3 – NSS + Eu; 4 – NSS + O₂ + Gd; 5 – NSS + Eu

Выводы

Упругие деформации в тонких пленках НСК, которые обусловлены несоответствием размеров атомов лантаноидов по отношению к кремнию, вызывают в решетке кремния деформацию растяжения, что приводит не только к количественным, но также к качественным изменениям структуры и электрофизических параметров деформированных пленок НСК. Подбор соотношений толщин слоев кремния и размера кристаллитов, легированных РЗЭ и германием, позволяет прогнозировать и управлять величиной ТКС как пленок, так и резисторов.

Список литературы

1. Oda S., Ferry D. Silicon nanoelectronics. *Taylor & Francis Group, LLC*; 2006.
2. Voigtlander B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studied by scanning tunneling microscopy during growth. *Surface Science Reports*. 2001;43:5-8.
3. Ковалевский А.А., Строгова А.С., Строгова Н.С., Бабушкина Н.В. Исследование электрофизических свойств МДП-структур с пленками нитрида кремния, легированными редкоземельными элементами. *Микроэлектроника*. 2014;43(4):246-251.
4. Комар О.М., Ковалевский А.А., Строгова А.С. *Кремнийгерманиевые наноструктурированные пленки и нанокластеры*. Германия: LAP Lambert Academic Publishing; 2016.
5. Полякова А.Л. *Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов*. Москва: Энергия; 1979.
6. Колешко В.М., Ковалевский А.А. *Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике*. Минск: Наука и техника; 1978.
7. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. *Основы наноэлектроники*. Москва: Логос; 2006.
8. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов. *Успехи химии*. 2009;78(9):867-888.
9. Чаплыгин Ю.А. *Нанотехнологии в электронике*. Москва: Техносфера; 2005.
10. Ковалевский А.А., Долбик А.В., Войтех С.Н. Влияние легирующей примеси на ТКС поликристаллических пленок кремния. *Микроэлектроника*. 2007;36(3):178-184.
11. Ковалевский А.А. Подавление рекристаллизационных процессов в поликристаллических пленках кремния тонкими слоями аморфного кремния. *Микроэлектроника*. 1998;27(1):16-21.
12. Kovalevskii A.A. Structure and Morphology of Si Films Grown on Porous Si by Reduction of Dichlorosilane. *Inorganic Materials*. 1999;35(2):102-105.
13. Ковалевский А.А., Борисенко В.Е., Борисевич В.М., Долбик А.В. Влияние легирующих примесей на структуру пленок поликристаллического кремния, полученных пиролизом силана. *Неорганические материалы*. 2005;41(12):1429-1435.
14. Строгова А.С., Ковалевский А.А., Гранько С.В., Воронец Я.С. Влияние легирования редкоземельными элементами и германием на структуру и свойства наноструктурированных пленок кремния. *10-я Юбилейная международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения»*. Москва, 15–16 мая 2019 г.: 73-74.

15. Ковалевский А.А., Строгова А.С., Комар О.М. Особенности роста нанонитей твердого раствора SiGe. Сборник тезисов VI Всероссийской конференции по наноматериалам. «НАНО-2016». Москва, 22–25 ноября 2016 г.: 255-256.

References

1. Oda S., Ferry D. Silicon nanoelectronics. *Taylor & Francis Group, LLC*; 2006.
2. Voigtlander B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studied by scanning tunneling microscopy during growth. *Surface Science Reports*. 2001;43:5-8.
3. Kovalevskii A.A., Strogova A.S., Strogova N.S., Babushkina N.V. [Investigation of electrical properties of MOS structures with silicon nitride films doped with rare earth elements]. *Russian Mikroelektronics*. 2014;43(4):246-251. (In Russ.)
4. Komar O.M., Kovakevkii A.A., Strogova A.S. [Silicongeranium nanostructured films and nanoclusters]. *LAP Lambert Academic Publishing*. 2016. (In Russ.)
5. Polyakova A.L. [Deformation of semiconductors and semiconductor devices]. Moscow: Energiya; 1979.
6. Koleshko V.M., Kovalevskii A.A. [Polycrystalline semiconductor films in microelectronics]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1978. (In Russ.)
7. Dragunov V.P., Neizvestnyj I.G., Gridchin V.A. [Nanoelectronics basics]. Moscow: Logos; 2006. (In Russ.)
8. Tret'yakov YU.D., Gudilin E.A. [Main directions of basic and oriented research in the field of nanomaterials] *Uspekhi himii*. 2009;78(9):867-888. (In Russ.)
9. Chaplygin Y.A. [Nanotechnology in Electronics]. Moscow: Tekhnosfera; 2005. (In Russ.)
10. Kovalevskii A.A., Dolbik A.V., Voitek S.N. [Effect of doping on the temperature coefficient of resistance of polysilicon films]. *Russian Microelectronics*. 2007;36(3):153-158. (In Russ.)
11. Kovalevskii A.A. [Suppression of recrystallization processes in polycrystalline silicon films by thin layers of amorphous silicon]. *Russian Microelectronics*. 1998; 27(1):16-21. (In Russ.)
12. Kovalevskii A.A. Structure and Morphology of Si Films Grown on Porous Si by Reduction of Dichlorosilane. *Inorganic Materials*. 1999;35(2):102-105.
13. Kovalevskii A.A., Borisenko V.E., Borisevich V.M., Dolbik A.V. [Doping Effect On the structure of polycrystalline silicon films grown via silane pyrolysis]. *Inorganic Materials*. 2005;41(12):1260-1265. (In Russ.)
14. Strogova A.S., Kovalevskii A.A., Granko S.V., Voronec Y.S. [Alloying influence by rare-earth elements and germanium on structure and properties of the nanostructured silicon films]. *10-ya Yubilejnaya mezhduнародnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya po fizike i tekhnologii nanogeterostrukturnoj SVCh-elektroniki "Mokerovskie chteniya"*. Moscow, 15–16 may 2019: 73-74. (In Russ.)
15. Kovalevskii A.A., Strogova A.S., Komar O.M. [Features of the growth of solid solution nanowires SiGe]. *Sbornik tezisev VI Vserossijskaya konferenciya po nanomaterialam. «NANO-2016»*. Moscow, 22–25 november 2016: 255-256. (In Russ.)

Вклад автора / Author's contribution

Автор выполняет данную работу для завершения докторской диссертации. Данные исследования проведены в рамках выполнения гранта Министерства образования Республики Беларусь на 2020 год.

The author performs this work to complete the doctoral dissertation. These researches were carried out as part of the Grant from the Ministry of Education of the Republic of Belarus for 2020.

Сведения об авторах

Строгова А.С., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Strogova A.S., PhD, Associate Professor at the Department of Electronics 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. +375-17-293-21-05;
e-mail: strogova@bsuir.by
Строгова Александра Сергеевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki Str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-21-05;
e-mail: strogova@bsuir.by
Strogova Aliaksandra Sergeevna