



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-157-164>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.2

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ХРОМА НА КРЕМНИИ

СОЛОВЬЕВ Я.А., ПИЛИПЕНКО В.А.

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

Поступила в редакцию 10 декабря 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Данная работа посвящена установлению влияния температуры процесса быстрой термообработки пленок хрома на кремнии *n*-типа проводимости на их удельное сопротивление и контактные свойства границы раздела. Пленки хрома толщиной порядка 30 нм наносили магнетронным распылением на поверхность кремниевых подложек с удельным сопротивлением 0,58–0,53 Ом×см. Быструю термообработку проводили в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с. В качестве источника нагрева использовали кварцевые галогенные лампы накаливания. Температуру процесса быстрой термообработки варьировали в интервале от 200 до 550 °С. Толщину пленок хрома определяли растровой электронной микроскопией. Поверхностное сопротивление образцов измеряли четырехзондовым методом. Высоту барьера Шоттки и коэффициент неидеальности определяли методом вольтамперных характеристик. Показано, что при температуре процесса быстрой термообработки 400 °С формируется слой дисилицида хрома, вызывающий резкое увеличение удельного сопротивления пленок хрома до 1,2 мОм×см и высоты барьера Шоттки до 0,6 В. При дальнейшем увеличении температуры процесса быстрой термообработки до 550 °С удельное сопротивление монотонно возрастает до 4,0 мОм×см за счет роста ширины межзеренных границ, увеличивающих рассеяние носителей заряда в CrSi₂. Также показано, что быстрая термообработка структуры Cr/Si при температуре 450–500 °С позволяет получать выпрямляющие контакты с высотой барьера 0,615 В и коэффициентом неидеальности 1,1. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий интегральной электроники, содержащих контакты Шоттки, а также тонкопленочные резисторы.

Ключевые слова: дисилицид хрома, диффузионный синтез, удельное сопротивление, диод Шоттки, высота барьера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Соловьев Я.А., Пилипенко В.А. Влияние условий быстрой термической обработки на электрофизические свойства тонких пленок хрома на кремнии. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 157-164.

EFFECT OF RAPID THERMAL TREATMENT CONDITIONS ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF CHROMIUM THIN FILMS ON SILICON

JAROSLAV A. SOLOVJOV, VLADIMIR A. PILIPENKO

JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 10 December 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. Present paper is devoted the determination of the effect of the temperature of the process of rapid thermal treatment of chromium films on *n*-type conductivity silicon on their resistivity and contact properties of the interface. Chromium films of about 30 nm thickness were deposited by magnetron sputtering onto the surface of silicon substrates having a resistivity of 0.58 to 0.53 ohms×cm. The rapid thermal treatment was carried out in a heat balance mode by irradiating the back side of the substrates with non-coherent light flux in nitrogen ambient for 7 seconds. Quartz halogen incandescent lamps were used as the heating source. The temperature of the rapid thermal process ranged from 200 to 550 °C. The thickness of the chromium films was determined by raster electron microscopy. The surface resistance of the samples was measured by a four-probe method. The Schottky barrier height and the ideality factor were determined from I-V plots. It is shown that at the temperature of the rapid thermal process 400 °C a layer of chromium disilicide is formed, causing a sharp increase in the resistivity of chromium films to 1.2 mOhm×cm and the height of the Schottky barrier to 0.6 V. When the temperature of the rapid thermal process is further increased to 550 °C, the resistivity increases monotonically to 4.0 mOhm×cm due to the increase in the width of the interstitial boundaries increasing the scattering of charge carriers in the CrSi₂ layers. It has also been shown that rapid thermal treatment of the Cr/Si structure at a temperature of 450–500 °C enables to obtain rectifying contacts with a barrier height of 0.615 V and an ideality factor of 1.1. The results obtained can be used in the technology of integrated electronics products containing Schottky contacts as well as thin film resistors.

Keywords: chromium disilicide, diffusion synthesis, specific resistance, Schottky diode, barrier height.

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

For citation. Solovjov J.A., Pilipenko V.A. Effect of rapid thermal treatment conditions on electrophysical properties of chromium thin films on silicon. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 157-164.

Введение

Силициды переходных металлов нашли широкое применение в технологии создания изделий интегральной электроники благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, таким как высокая проводимость, простота формирования, высокая химическая стойкость, механическая стабильность, низкие внутренние механические напряжения, возможность формировать с кремнием барьеры Шоттки с заданной высотой [1]. В современной технологии КМОП интегральных схем силициды применяют для снижения сопротивления контактов, а также материала межсоединений [2]. Особый интерес силициды представляют в качестве барьеров Шоттки в изделиях силовой электроники, характерной особенностью которых является необходимость формирования протяженных границ раздела силицид – кремний с низкой дефектностью и микрошероховатостью [3]. При этом наилучшим способом формирования протяженных слоев силицидов является их диффузионный синтез путем термообработки тонких пленок металлов, нанесенных на поверхность кремния, поскольку в таком случае формируется атомарно чистая граница раздела силицид – кремний с минимальными колебаниями контактных свойств [1]. С другой стороны, наилучшее качество силицидных слоев при диффузионном синтезе обеспечивается путем быстрой термообработки (БТО) благодаря минимальному термическому бюджету и возможности обеспечения исключительной чистоты процесса в реакторе ограниченного объема [2, 4].

Пленки дисилицида хрома в изделиях интегральной электроники нашли распространение в качестве материала тонкопленочных резисторов и барьеров Шоттки. Кроме того, дисилицид хрома является полупроводником *p*-типа проводимости с шириной запрещенной зоны порядка 0,35 В, что делает его привлекательным для использования в фотодетекторах ИК диапазона [5]. Электрофизические свойства пленок дисилицида хрома сильно зависят от способа их получения и условий проведения диффузионного синтеза, что во многом объясняет существенные различия в результатах экспериментальных данных различных авторов (табл. 1, 2). Таким образом, для получения конкретных значений электрофизических параметров дисилицида хрома необходимо их изучение в зависимости от условий их формирования.

Таблица 1. Значения удельного сопротивления пленок дисилицида хрома, полученных диффузионным синтезом
Table 1. Values of specific resistance of chromium disilicide films fabricated with diffusion synthesis

Условия получения пленок CrSi ₂ Fabrication CrSi ₂ films conditions				Удельное сопротивление CrSi ₂ при комнатной температуре, мОм×см Specific resistance CrSi ₂ at room temperature, mOhm×cm	Источник Source
Толщина исходной пленки Cr, нм Thickness of initial Cr film, nm	Условия диффузионного синтеза Diffusion synthesis conditions				
	Тип термообработки Thermal treatment type	Температура процесса, °С Process temperature, °C	Время процесса Process time		
объемные образцы				0,5–1,0	[6]
не указано	стационарная	не указано	не указано	3,6–20	
100–400	стационарная	450–600	30 мин	2–4	[7]
10	быстрая	400–670	20 с	2,2	[8, 9]

Таблица 2. Значения высоты барьера и коэффициентов неидеальности пленок хрома на кремнии *n*-типа
Table 2. Values of barrier height and ideality factor of chromium films on *n*-type silicon

Условия формирования барьера Cr/Si Fabrication Cr/Si barrier conditions				Высота барьера Шоттки, В Schottky barrier height, V	Коэффициент неидеальности Ideality factor	Источник Source
Толщина исходной пленки Cr, нм Thickness of initial Cr film, nm	Условия диффузионного синтеза Diffusion synthesis conditions					
	Тип термообработки Thermal treatment type	Температура процесса, °С Process temperature, °C	Время процесса, мин Process time, min			
не указано	без термообработки			0,61	–	[10]
не указано	стационарная	450	не указано	0,57	–	
50	стационарная	450	15	0,46	2,0	[11]
300		500	15	0,68	1,1	
300	без термообработки			0,56	1,01	[12]
300	стационарная	440	80	0,62	1,06	

Настоящая работа посвящена установлению влияния температуры процесса БТО пленок хрома на кремнии *n*-типа проводимости на их удельное сопротивление и контактные свойства границы раздела.

Методика проведения эксперимента

Пленки хрома толщиной порядка 30 нм наносили магнетронным распылением хромовой мишени чистотой 99,5 % в среде аргона чистотой 99,993 % при давлении 0,5 Па на установке SNT «Sigma» с безмасляной откачкой на кремниевые подложки двух типов. Подложки первого типа представляли собой эпитаксиальные слои легированного фосфором кремния с удельным сопротивлением 0,58–0,63 Ом×см и толщиной 5,3–5,8 мкм, сформированные на подложках монокристаллического кремния 100 КДБ 10 (111). Подложки

второго типа представляли собой эпитаксиальные слои с аналогичными параметрами на подложках монокристаллического кремния 100 КЭМ 0,005 (111), содержащие охранные кольца и вскрытые в полевым окисле контакты для формирования структуры диодов Шоттки размером кристалла 1,42×1,42 мм. После нанесения слоя хрома на подложках второго типа выполняли фотолитографию с последующим травлением слоев хрома в цериевом травителе.

Далее подложки обоих типов подвергали быстрой термической обработке в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с при температуре от 200 до 550 °С. Источником нагрева служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Контроль температуры рабочей стороны подложки осуществлялся термопарой с точностью ± 0,5 °С.

На подложках первого типа осуществляли измерение поверхностного сопротивления с помощью установки RS-30 с погрешностью не более ± 5 %. Для определения поверхностного сопротивления непосредственно пленок хрома $R_{S\ TF}$ (Ом/кв) отдельно проводили измерения поверхностного сопротивления исходных подложек перед нанесением хрома и после процесса быстрой термообработки и проводили расчет по формуле

$$R_{S\ TF} = \frac{R_{S\ SUB} \cdot R_{S\ RTA}}{R_{S\ RTA} - R_{S\ SUB}}, \quad (1)$$

где $R_{S\ SUB}$ – поверхностное сопротивление подложки, Ом/кв, $R_{S\ RTA}$ – поверхностное сопротивление структуры подложка – пленка после быстрой термообработки, Ом/кв.

Величину удельного сопротивления ρ (Ом×см) пленок хрома после термообработки рассчитывали по формуле

$$\rho = R_{S\ TF} \cdot d_{TF}, \quad (2)$$

где d_{TF} – толщина пленки хрома на кремнии после термообработки, см.

В свою очередь, толщину пленок хрома после термообработки определяли с помощью растрового электронного микроскопа S-4800 ф. Hitachi (Япония) с погрешностью не более ± 5 %.

Для подложек второго типа после быстрой термообработки последовательно наносили на рабочую сторону слой титана толщиной 0,11 мкм и сплава алюминий-кремний толщиной 1,4 мкм и при помощи фотолитографии формировали металлизацию анода. Затем подложки подвергали шлифованию обратной стороны до остаточной толщины 300 мкм и на обратную сторону подложек наносили металлизацию катода последовательным напылением в вакууме слоев титана, сплава никель-ванадий и серебра. После этого подложку разделяли на отдельные кристаллы, которые собирали в пластмассовый корпус типа ТО-220.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились на комплексе прецизионных измерений характеристик элементной базы ИМС В1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade. Высоту барьера Шоттки ϕ_B (В) и коэффициент неидеальности n определяли методом ВАХ [10] путем экспоненциальной аппроксимации начального участка прямой ВАХ диода Шоттки к оси ординат с последующими расчетами по формулам:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{SA^{**}T^2}{I_0} \right), \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \times 10^{-23}$ Дж×К⁻¹, T – абсолютная температура, равная 296 К, q – заряд электрона, равный $1,602 \times 10^{-23}$ Кл, S – площадь выпрямляющего контакта, равная $1,38 \times 10^{-2}$ см², A^{**} – эффективная постоянная Ричардсона, равная $112 \text{ А} \times \text{см}^{-2} \times \text{К}^{-2}$, I_0 – ток насыщения (А), определяемый точкой пересечения прямой экспоненциальной аппроксимации начального участка ВАХ с осью ординат,

$$n = \frac{q}{kTE_a}, \quad (4)$$

где E_a – множитель под экспонентой в уравнении прямой экспоненциальной аппроксимации начального участка ВАХ.

Результаты и их обсуждение

1. *Удельное сопротивление.* Зависимость величины удельного сопротивления пленок хрома на кремнии от температуры БТО представлена на рис. 1. Для исходных пленок хрома до БТО величина удельного сопротивления составляет порядка $0,1 \text{ мОм} \times \text{см}$, что более, чем в 7 раз превышает величину удельного сопротивления для объемного материала, которая составляет $0,013 \text{ мОм} \times \text{см}$ [13], и объясняется размерным эффектом, приводящим к росту удельного сопротивления в тонких пленках. В диапазоне температур БТО от 200 до 350 °С наблюдается незначительное снижение удельного сопротивления от первоначальных значений до величины порядка $0,07\text{--}0,09 \text{ мОм} \times \text{см}$, что вызвано перекристаллизацией пленок Cr на кремнии и релаксацией в них остаточных механических напряжений. Скачкообразный рост удельного сопротивления при температуре БТО 400 °С более чем на порядок до величины $1,2 \text{ мОм} \times \text{см}$ однозначно вызван началом фазовых превращений в системе Cr/Si, сопровождаемых формированием переходного слоя дисилицида хрома, что согласуется также с данными других авторов [14]. Величина удельного сопротивления при данной температуре имеет более низкие значения, чем в других аналогичных работах, а также в ряде случаев она меньше, чем для объемного дисилицида хрома. Это свидетельствует о неполном переходе хрома в фазу CrSi₂. Существенный разброс удельного сопротивления после БТО при температуре 400 °С свидетельствует об околопороговом значении данной температуры для образования силицидной фазы.

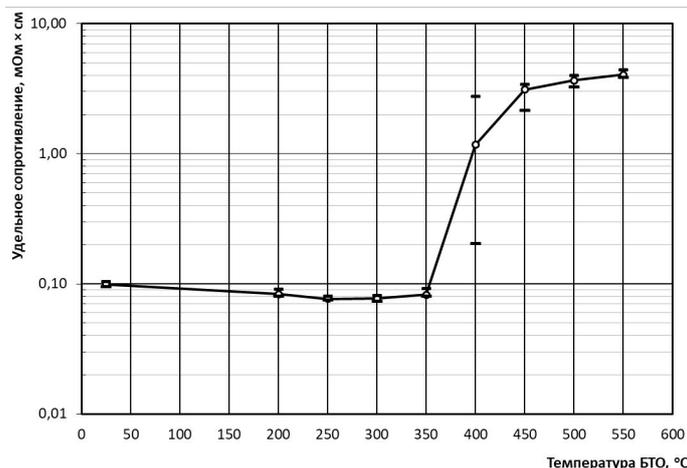


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления пленок хрома от температуры БТО
Fig. 1. Dependence of chromium films specific resistance on RTP temperature

При увеличении температуры БТО от 450 до 550 °С удельное сопротивление пленок достигает значений от 3,0 до 4,0 мОм×см, которые хорошо согласуются с данными табл. 1 для дисилицида хрома. Монотонный рост величины удельного сопротивления при увеличении температуры термообработки обусловлен ростом ширины межзеренных границ в CrSi₂, что приводит к усилению эффекта рассеяния на них носителей заряда [6].

2. *Барьер Шоттки.* Результаты определения высоты барьера Шоттки и коэффициента неидеальности в зависимости от температуры БТО представлены на рис. 2, 3. Высота барьера Шоттки исходной системы Cr/Si, не подвергнутой термообработке, составляет 0,554 В, что согласуется с результатами работы [12] для барьеров из чистого хрома на кремнии *n*-типа. Относительно высокие значения коэффициента неидеальности для исходной системы Cr/Si на уровне значений 1,25, очевидно, связаны частично с относительно малой толщиной исходных пленок хрома, а частично с их структурным несовершенством после процесса нанесения. В диапазоне температур БТО от 200 до 300 °С наблюдается небольшое увеличение высоты барьера с 0,563 до 0,57 В и улучшение коэффициента неидеальности с 1,2 до 1,17, что обусловлено рекристаллизацией пленок хрома, сопровождаемой улучшением совершенства их кристаллической структуры и релаксацией остаточных механических напряжений.

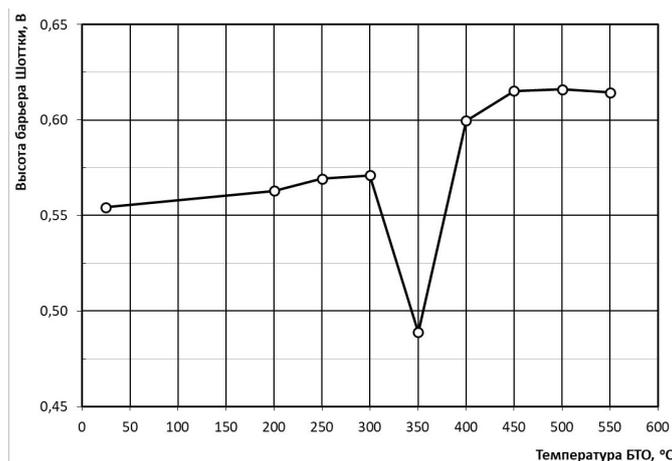


Рис. 2. Зависимость высоты барьера Шоттки структуры Cr/Si от температуры БТО
Fig. 2. Dependence of Cr/Si structure Schottky barrier height on RTP temperature

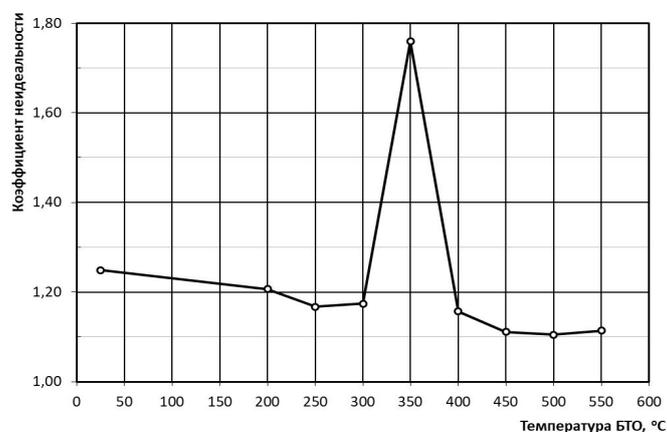


Рис. 3. Зависимость коэффициента неидеальности барьера Шоттки структуры Cr/Si от температуры БТО
Fig. 3. Dependence of Cr/Si structure Schottky barrier ideality factor on RTP temperature

При температуре БТО 350 °C наблюдается скачкообразное падение значений высоты барьера Шоттки до величины порядка 0,49 В и рост коэффициента неидеальности до величины порядка 1,7. В целом данная ситуация свидетельствует о деградации границы раздела Cr/Si, что, вероятнее всего, объясняется начальными процессами ее перестроения при формировании фазы CrSi₂. При температуре БТО 400 °C наблюдается рост высоты барьера Шоттки до 0,6 В и улучшение коэффициента неидеальности барьера до 1,16, что указывает на наличие фазы CrSi₂ на границе раздела. При БТО структуры Cr/Si в интервале температур от 450 до 500 °C достигаются наилучшие показатели высоты барьера и коэффициента неидеальности, составляющие величины порядка 0,615 В и 1,1 соответственно, что весьма близко к результатам работы [12]. При увеличении температуры БТО структуры Cr/Si до 550 °C наблюдается тенденция к росту высоты барьера Шоттки и ухудшению коэффициента неидеальности, что в целом подтверждает ранее сделанный вывод о переформировании кристаллической структуры, затрагивающем границу раздела.

Заключение

В работе исследовано влияние температуры процесса БТО пленок хрома толщиной порядка 30 нм на кремнии *n*-типа проводимости в интервале от 200 до 550 °C на их удельное сопротивление и контактные свойства границы раздела Cr/Si. Показано, что при температуре процесса БТО 400 °C формируется слой дисилицида хрома, вызывающий резкое увеличение удельного сопротивления пленок хрома до 1,2 мОм×см и высоты барьера Шоттки до 0,6 В. При дальнейшем увеличении температуры процесса БТО до 550 °C удельное сопротивление монотонно возрастает до 4,0 мОм×см за счет роста ширины межзеренных границ,

увеличивающих рассеяние носителей заряда в CrSi_2 . Также показано, что БТО структуры Cr/Si при температуре 450–500 °C позволяет получать выпрямляющие контакты с высотой барьера 0,615 В и коэффициентом неидеальности 1,1. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий интегральной электроники, содержащих контакты Шоттки, а также тонкопленочные резисторы.

Список литературы

1. Мьюрарка Ш.П. *Силициды для СБИС*. Москва: Мир; 1986.
2. Doering R., Nishi Y. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. 2nd edition. New York: CRC Press; 2008.
3. Баранов В.В. Материалы и процессы формирования самосовмещенных пленочных структур изделий твердотельной электроники и микроэлектроники. *Доклады БГУИР*, 2004;3:103-117.
4. Пилипенко В. *Быстрые термообработки в технологии СБИС*. Минск: Издательский Центр БГУ; 2004.
5. Филонов А.Б., Иваненко Л.И., Мигас Д.Б., Шапошников В.Л., Кривошеева А.В., Кривошеев А.Е., Борисенко В.Е. Полупроводниковые силициды, свойства и перспективы применения. *Доклады БГУИР*. 2004;3:168-179.
6. Borisenko V.E. *Semiconducting Silicides*. Berlin: Springer; 2000.
7. Lange H., Giehler M., Henrion W., Fenske F., Sieber I., Oertel G. Growth and Optical Characterization of CrSi_2 Thin Films. *Physica. Status. Solidi. B*. 1992;171:63-76. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221710108>.
8. Gasparov V.A., Grazhulis V.A., Bondarev V.V., Bychkova T.M., Lifshits V.G., Churusov B.K., Galkin N.G., Plusnin N.I. Electrophysical properties of the surface phases of In and Cr on Si(111). *Vacuum*. 1990;41:(4-6):1207-1210.
9. Gasparov V.A., Grazhulis V.A., Bondarev V.V., Bychkova T.M., Lifshits V.G., Galkin N.G., Plusnin N.I. Electron transport in the Si(111)- $\text{Cr}(\sqrt{3}\times\sqrt{3})\text{R}30^\circ$ αSi surface phase and in epitaxial films of GrSi, CrSi_2 on Si(111). *Surface Science*. 1993;292(3):298-304.
10. Зи С.М. *Физика полупроводниковых приборов*. Москва: Мир; 1984.
11. Martinez A., Esteve D., Guivarch A., Auvray P., Henoch P., Pelous G. Metallurgical and Electrical Properties of Chromium Silicon Interfaces. *Solid-State Electronics*. 1980;23:55-64.
12. Turan R., Akman N. Schottky barrier height of CrSi_2 -Si junctions. *Semicond. Sci. Technol*. 1993;8:1999-2002.
13. Пасынков В.В., Сорокин В.С. *Материалы электронной техники*. Санкт-Петербург: Лань; 2001.
14. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductor*. Berlin: Springer; 1997.

References

1. M'jurarka Sh.P. [*Silitsidy dlja SBIS*]. Moskva: Mir; 1986. (In Russ.)
2. Doering R., Nishi Y. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. 2nd edition. New York: CRC Press; 2008.
3. Baranov V.V. [Materials and technologies of self-aligned thin film structures formation for solid-state devices and VLSI applications]. *Doklady BGUIR=Doklady BGUIR*. 2004;3:103-117. (In Russ.)
4. Pilipenko V.A. [*Bystrye termoobrabotki v tehnologii SBIS*]. Minsk: Izdatelskij centr BGU; 2004. (In Russ.)
5. Filinov A.B., Ivanenko L.I., Migas D.B., Shaposhnikov V.L., Krivosheeva A.V., Krivosheev A.E., Borisenko V.E. Semiconducting silicides: properties and aspects of application. *Doklady BGUIR=Doklady BGUIR*. 2004;3:168-179. (In Russ.)
6. Borisenko V.E. *Semiconducting Silicides*. Berlin: Springer; 2000.
7. Lange H., Giehler M., Henrion W., Fenske F., Sieber I., Oertel G. Growth and Optical Characterization of CrSi_2 Thin Films. *Physica. Status. Solidi. B*. 1992;171:63-76. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221710108>.
8. Gasparov V.A., Grazhulis V.A., Bondarev V.V., Bychkova T.M., Lifshits V.G., Churusov B.K., Galkin N.G., Plusnin N.I. Electrophysical properties of the surface phases of In and Cr on Si(111). *Vacuum*. 1990;41:(4-6):1207-1210
9. Gasparov V.A., Grazhulis V.A., Bondarev V.V., Bychkova T.M., Lifshits V.G., Galkin N.G., Plusnin N.I. Electron transport in the Si(111)- $\text{Cr}(\sqrt{3}\times\sqrt{3})\text{R}30^\circ$ αSi surface phase and in epitaxial films of GrSi, CrSi_2 on Si(111). *Surface Science*. 1993;292(3):298-304.
10. Zee S.M. [*Fizika poluprovodnikovyh priborov*]. Moscow: Mir; 1984. (In Russ.)
11. Martinez A., Esteve D., Guivarch A., Auvray P., Henoch P., Pelous G. Metallurgical and Electrical Properties of Chromium Silicon Interfaces. *Solid-State Electronics*. 1980;23:55-64.
12. Turan R., Akman N. Schottky barrier height of CrSi_2 -Si junctions. *Semicond. Sci. Technol*. 1993;8:1999-2002.
13. Pasyunkov V.V., Sorokin V.S. [*Materialy elektronnoi tehniki*]. St. Petersburg: Lan'; 2001. (In Russ.)
14. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductor*. Berlin: Springer; 1997.

Вклад авторов

Соловьёв Я.А. изготовил экспериментальные образцы, выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Пилипенко В.А. осуществил постановку задачи, выполнил электрофизические измерения.

Authors contribution

Solovjov J.A. made experimental samples, performed analysis and interpretation of the results.

Pilipenko V.A. carried out the statement of the problem, performed electrophysical measurements.

Сведения об авторах

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

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмик-роанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Solovjov J.A., PhD, as. prof., deputy director of “Transistor” Branch JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Pilipenko V.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus., deputy director of Science Development of State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Адрес для корреспонденции

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

Address for correspondence

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