

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ И БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТОК  
НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА  
АЛЮМИНИЙ – ПОЛИКРЕМНИЙ

В. А. ПИЛИПЕНКО<sup>1),2)</sup>, Н. С. КОВАЛЬЧУК<sup>1)</sup>, Д. В. ЖИГУЛИН<sup>1)</sup>,  
Д. В. ШЕСТОВСКИЙ<sup>1)</sup>, В. М. АНИЩИК<sup>2)</sup>, В. В. ПОНАРЯДОВ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,  
ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Исследовано влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий – поликремний на структурах алюминий – поликремний – двуокись кремния в целях изучения омических контактов в элементной базе интегральных микросхем. Полученные структуры были подвергнуты различным видам термообработки: стандартному (длительному) термическому отжигу (450 °С, 20 мин, среда N<sub>2</sub>), используемому для создания омических контактов на этапе производства интегральных микросхем, и быстрому термическому отжигу (450 °С, 7 с, среда Ar). Установлено, что при длительной термообработке происходит полное растворение поликремния в алюминии с последующей сегрегацией в виде отдельных остроугольных конгломератов поликремния на поверхности двуокиси кремния, что может привести к полному отказу работоспособности интегральной микросхемы. При быстрой термообработке подобного эффекта не наблюдается. Таким образом, при формировании омического контакта алюминий – поликремний на этапе производства интегральных микросхем целесообразно использовать быструю термообработку, которая существенно уменьшает растворение поликремния в алюминии и тем самым способствует формированию омического контакта.

**Ключевые слова:** граница раздела алюминий – поликремний; омический контакт; быстрая термообработка; интегральная микросхема; растровая электронная микроскопия; энергодисперсионный микроанализ.

**Образец цитирования:**

Пилипенко ВА, Ковальчук НС, Жигулин ДВ, Шестовский ДВ, Анищик ВМ, Понарядов ВВ. Влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий – поликремний. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2023;2:51–57. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-2-51-57>

**For citation:**

Pilipenka UA, Kovalchuk NS, Zhyhulin DV, Shestovski DV, Anishchik VM, Ponariadov VV. Effect of long-term and rapid thermal treatments on the formation of the aluminum – polysilicon interface. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2023;2:51–57. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-2-51-57>

---

Сведения об авторах см. на с. 57.

Information about the authors see p. 57.



## EFFECT OF LONG-TERM AND RAPID THERMAL TREATMENTS ON THE FORMATION OF THE ALUMINUM – POLYSILICON INTERFACE

*U. A. PILIPENKA<sup>a, b</sup>, N. S. KOVALCHUK<sup>a</sup>, D. V. ZHYHULIN<sup>a</sup>,  
D. V. SHESTOVSKI<sup>a</sup>, V. M. ANISHCHIK<sup>b</sup>, V. V. PONARIADOV<sup>b</sup>*

<sup>a</sup>«Integral» – Holding Management Company, 121a Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: D. V. Zhyhulin (zhyhulin@mail.ru)

The influence of long-term and rapid thermal treatments on the formation of the aluminum – polysilicon interface on aluminum – polysilicon – silicon dioxide structures in order to study the ohmic contacts in the element base of integrated circuits are considered. The obtained structures were subjected to various thermal treatments: standard (long-term) thermal annealing (450 °C, 20 min, N<sub>2</sub> environment) used to create ohmic contacts at the stage of integrated circuit manufacturing and rapid thermal annealing (450 °C, 7 s, Ar environment). It is established, that during long-term thermal treatment, polysilicon is completely dissolved in aluminum, followed by segregation in the form of separate acute-angled polysilicon conglomerates on the surface of silicon dioxide, which can lead to a complete failure of the integrated circuit. With rapid thermal treatment, this effect is not observed. Thus, when forming an ohmic aluminum – polysilicon contact at the stage of integrated circuit manufacturing, it is advisable to use rapid thermal treatment, which significantly reduces the dissolution of polysilicon in aluminum and thereby contributes to the formation of an ohmic contact.

**Keywords:** aluminum – polysilicon interface; ohmic contact; rapid thermal treatment; integrated circuit; scanning electron microscopy; energy dispersive microanalysis.

### Введение

При усиливающейся тенденции к повышению плотности компоновки современных интегральных микросхем (ИМС), а значит, к уменьшению проектных норм все большее значение приобретает снижение тепловой нагрузки, оказываемой на полупроводниковую пластину в процессе формирования на ней элементной базы ИМС. Это требует разработки новых технологических процессов, использующих либо более низкую температуру, либо более короткое время их проведения. Данная тенденция обусловлена необходимостью значительно уменьшить длительность диффузионных процессов, имеющих место при высокотемпературных обработках, а также практически исключить загрязнение полупроводникового материала неконтролируемыми примесями. Особенно остро этот вопрос стоит при формировании омических контактов к кремнию и поликремнию. Процесс создания таких контактов представляет собой осаждение алюминия на кремний и поликремний с последующим применением длительной термообработки (510 °C, 10 мин или 450 °C, 20 мин [1]). Простейшее представление о взаимодействии алюминия с полупроводником заключается в том, что при диффузии металла в кристаллическую решетку кремния происходит ослабление и разрыв ковалентных связей Si—Si с образованием подвижных атомов кремния [2]. Поток атомов кремния в направлении межфазной границы алюминий – кремний сопровождается потоком атомов алюминия, ориентированным в противоположном направлении. Таким образом, возникает процесс взаимного диффузионного перераспределения как металла в кремнии, так и кремния в металле, который усиливается при длительной термообработке, что приводит к значительному ухудшению параметров создаваемых ИМС, а следовательно, к снижению процента выхода годных изделий [3].

Одним из методов, уменьшающих диффузионные процессы при высокотемпературных обработках, в том числе при формировании омических контактов, является применение быстрой термообработки (БТО) [4–20]. Однако в публикациях [4–20] описывается лишь взаимодействие алюминиевой металлизации с монокристаллическим кремнием при создании омических контактов. При этом не затрагиваются вопросы формирования омического контакта алюминий – поликремний, его поведения при различных температурных нагрузках в процессе создания элементной базы ИМС. Проведение таких исследований позволит установить особенности формирования омических контактов не только к поликремниевым резисторам и конденсаторам, но и к поликремниевым затворам полевых транзисторов, что непременно скажется на их выходных характеристиках, а значит, и на работоспособности всей ИМС.

### Материалы и методы исследования

На кремниевых пластинах марки КДБ-10 диаметром 100 мм и ориентацией  $\langle 111 \rangle$  пироженным окислением при температуре 850 °С формировался оксид кремния толщиной 70 нм. Затем на оксид кремния методом газофазного осаждения наносился слой поликремния толщиной 0,25 мкм, на поверхность которого магнетронным методом напылялась пленка алюминия толщиной 1,5 мкм. Для напыления пленки использовалась алюминиевая мишень с 1 % примеси кремния. Часть полученных структур алюминий – поликремний – двуокись кремния подвергались различным видам термообработки: стандартной (длительной) термообработке (450 °С, 20 мин, среда N<sub>2</sub>) и БТО (450 °С, 7 с, среда Ar). Другая часть структур не подвергались воздействию температуры. Процесс БТО пластин выполнялся в среде Ar при атмосферном давлении системой УБТО ПИТ-1801 (ООО «Перспективные инновационные технологии», Беларусь). Атмосфера Ar была выбрана в целях исключения процессов окисления алюминия при термообработке. Пластины облучались с непланарной стороны потоками фотонов 20 галогенных ламп импульсами постоянной мощности длительностью 7 с. Мощность излучения ламп обеспечивала достижение температуры нагрева пластины 450 °С в течение 7 с.

Исследование границы раздела алюминий – поликремний и определение элементного состава осуществлялись на сколе пластины с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 (Hitachi, Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax-200 (Bruker, Германия).

### Результаты и их обсуждение

Влияние длительной термообработки и БТО на формирование границы раздела алюминий – поликремний показано на рис. 1–3.

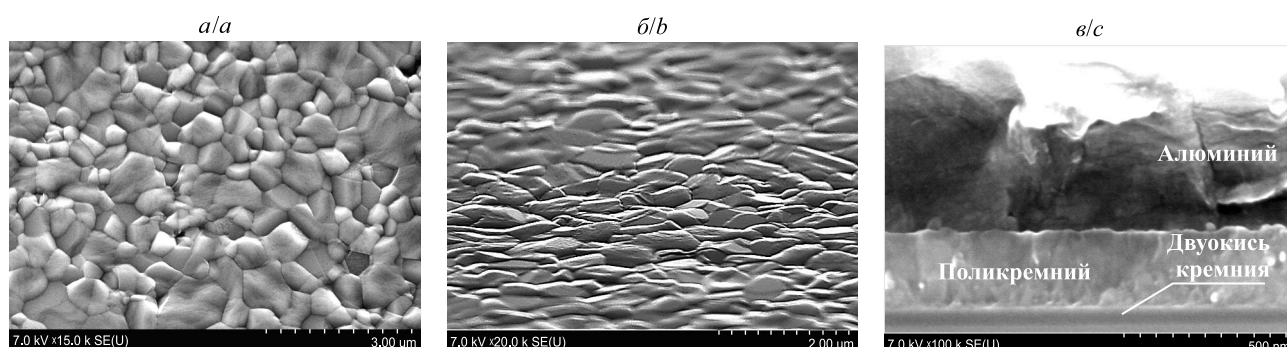


Рис. 1. РЭМ-изображения структуры алюминий – поликремний – двуокись кремния без термообработки: *a* – поверхность алюминия без наклона; *b* – поверхность алюминия под наклоном; *в* – скол структуры  
Fig. 1. SEM images of the aluminum – polysilicon – silicon dioxide structure without thermal treatment: *a* – aluminum surface without tilt; *b* – tilted aluminum surface; *c* – structure cross section

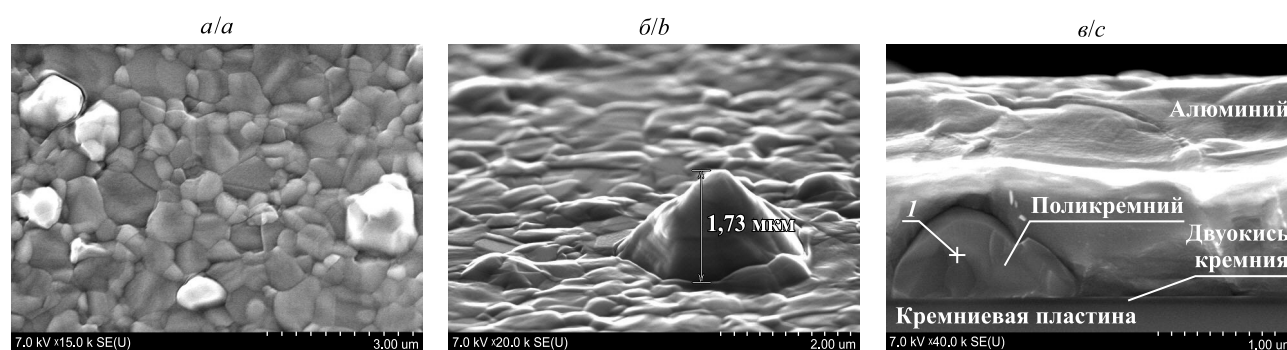


Рис. 2. РЭМ-изображения структуры алюминий – поликремний – двуокись кремния после длительной термообработки (450 °С, 20 мин, среда N<sub>2</sub>): *a* – поверхность алюминия без наклона; *b* – поверхность алюминия под наклоном; *в* – скол структуры  
Fig. 2. SEM images of the aluminum – polysilicon – silicon dioxide structure after long-term treatment (450 °C, 20 min, N<sub>2</sub> environment): *a* – aluminum surface without tilt; *b* – tilted aluminum surface; *c* – structure cross section

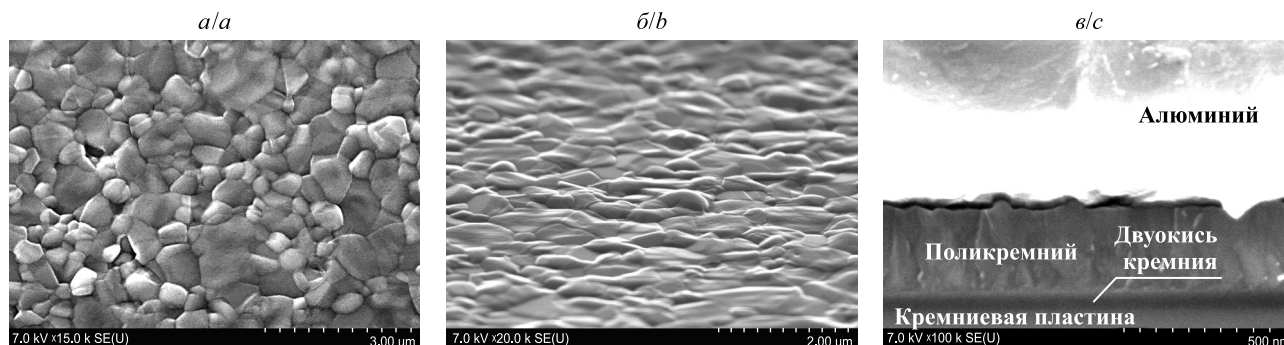


Рис. 3. РЭМ-изображения структуры алюминий – поликремний – двуокись кремния после БТО (450 °С, 7 с, среда Ar): а – поверхность алюминия без наклона; б – поверхность алюминия под наклоном; в – скол структуры

Fig. 3. SEM images of the aluminum – polysilicon – silicon dioxide structure after rapid thermal treatment (450 °C, 7 s, Ar environment):

a – aluminum surface without tilt; b – tilted aluminum surface; c – structure cross section

Анализ полученных данных показал, что имеется значительная разница между длительной термообработкой (450 °С, 20 мин, среда N<sub>2</sub>) и БТО (450 °С, 7 с, среда Ar). При длительной термообработке происходит полное растворение поликремния в алюминии с последующей сегрегацией в виде отдельных конгломератов поликремния на поверхности двуокиси кремния. Элементный состав данных конгломератов приведен на рис. 4.

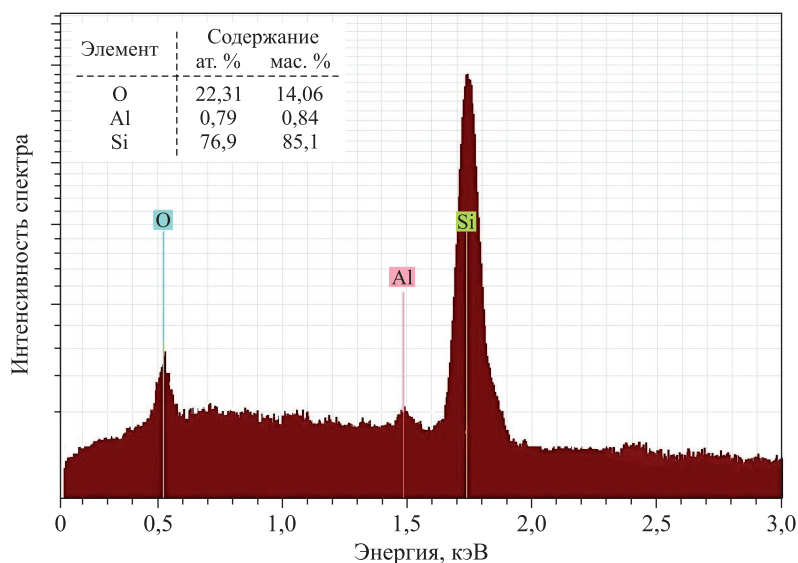


Рис. 4. Энергодисперсионный спектр конгломерата поликремния (см. рис. 2, в, точка 1)

Fig. 4. EDX spectrum of the polysilicon conglomerate (see fig. 2, c, point 1)

Высота конгломератов поликремния может значительно превышать толщину напыленной пленки алюминия. Поскольку алюминий гораздо более мягкий материал, чем поликремний, то своими острыми углами поликремний легко протыкает пленку алюминия насквозь (см. рис. 2, а и б), что может привести к замыканию соседних топологических слоев ИМС, а значит, и к полному отказу микросхемы.

Для оценки размеров образовавшихся конгломератов поликремния пленка алюминия была стравлена в растворе на основе фосфорной и азотной кислот, в котором поликремний не травится. На рис. 5 представлены РЭМ-изображения конгломератов поликремния после стравливания слоя алюминия и их элементный состав.

Из рис. 5, а и б, видно, что пленка поликремния превращается в крупные конгломераты поликремния с остроугольными краями на поверхности двуокиси кремния, что может сказаться на работоспособности ИМС, при создании которых используются слои поликремния, имеющие контакты с алюминием.

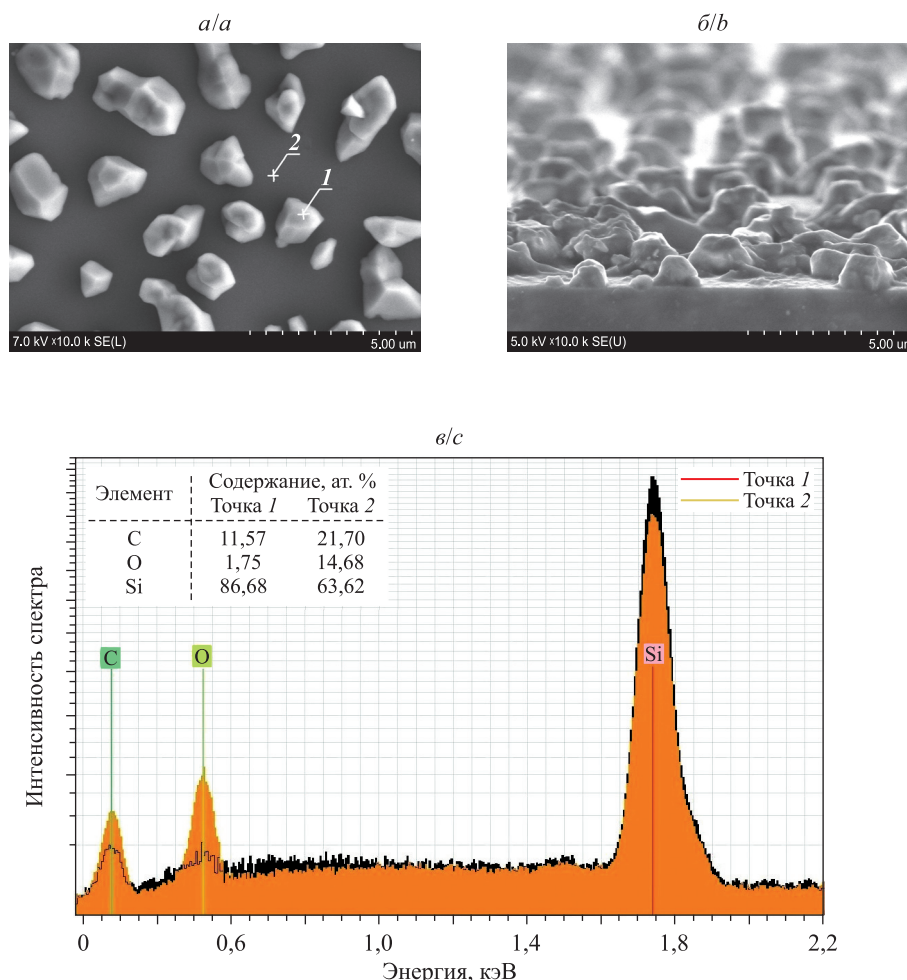


Рис. 5. РЭМ-изображения конгломератов поликремния на поверхности двуоксида кремния без наклона (а) и под наклоном (б), а также их энергодисперсионный спектр (в)

Fig. 5. SEM images of the polysilicon conglomerates on the silicon dioxide surface without tilt (a) and tilted surface (b), as well as EDX spectrum (c)

### Заключение

Применение длительных термообработок (450 °С, 20 мин) при производстве современных ИМС с постоянно уменьшающимися проектными нормами приводит к ухудшению параметров ИМС и, как следствие, низкому проценту выхода годных изделий. Данное обстоятельство обусловлено тем, что с уменьшением проектных норм изготовления ИМС все большее значение приобретают диффузионные процессы на границах раздела топологических слоев. Так, в месте соприкосновения омического алюминиевого контакта к поликремниевым затворам МОП-транзисторов, резисторов, конденсаторов происходит растворение поликремния в алюминии с последующей сегрегацией в виде отдельных остроугольных конгломератов поликремния, которые не только ухудшают выходные характеристики ИМС, но и приводят к их полному отказу в результате замыкания топологических слоев. Одним из способов уменьшения диффузионных процессов в микроэлектронике является замена стандартного термического отжига на БТО, позволяющую избежать разрушения омических алюминиевых контактов к поликремниевым топологическим элементам, а значит, увеличить процент выхода годных ИМС.

### Библиографические ссылки

1. Пилипенко ВА. Быстрые обработки в технологии СБИС. Минск: Издательский центр БГУ; 2004. 531 с.
2. Поут Дж, Ту К, Мейер Дж, редакторы. Тонкие пленки: взаимная диффузия и реакции. Москва: Мир; 1982. 576 с.
3. Могэб К, Фрейзер Д, Фичтнер У, Паррильо Л, Маркус Р, Стейдел К и др. Технология СБИС. Книга 2. Зи С, редактор. Москва: Мир; 1986. 453 с.
4. Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Горущко ВА. Режимы быстрой термообработки системы Pt – Si для формирования силицида платины. Доклады БГУИР. 2018;8:88–92.

5. Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Горушко ВА, Филипеня ВА. Влияние режимов формирования силицида платины методом быстрой термообработки на параметры диодов Шоттки. *Доклады БГУИР*. 2019;1:62–67.
6. Анищик ВМ, Горушко ВА, Пилипенко ВА, Понарядов ВВ, Солодуха ВА. Электропроводность пленок силицида платины, сформированных с применением быстрой термообработки. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;1:27–31.
7. Беляев АЕ, Болтовец НС, Кладько ВП, Сафрук-Романенко НВ, Любченко АИ, Шеремет ВН и др. Особенности температурной зависимости удельного контактного сопротивления диффузионных кремниевых структур Au – Ti – Pd –  $n^+$  –  $n$ -Si. *Физика и техника полупроводников*. 2019;53(4):485–492. DOI: 10.21883/FTP.2019.04.47445.9012.
8. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA, Komarov FF, Milchanin OV. Formation of platinum silicide layers during the rapid thermal processing of the platinum – silicon system: structural-phase changes. *High Temperature Material Processes*. 2019;23(3):195–208. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v23.i3.10.
9. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA, Kupchishin AN, Komarov FF, Milchanin OV. Formation of platinum silicide during rapid thermal processing of the platinum – silicon system: microstructure and electrophysical characteristics. *High Temperature Material Processes*. 2019;23(3):255–273. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2019031214.
10. Соловьёв ЯА, Пилипенко ВА. Влияние условий быстрой термической обработки на электрофизические свойства тонких пленок хрома на кремнии. *Доклады БГУИР*. 2019;7–8:157–164. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-157-164.
11. Соловьёв ЯА, Пилипенко ВА. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства пленок никеля на кремнии. *Доклады БГУИР*. 2020;18(1):81–88. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-1-81-88.
12. Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Комаров ФФ, Горушко ВА. Влияние временных режимов термообработки на микроструктуру системы Pt – Si. *Доклады БГУИР*. 2020;18(2):105–111. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-2-105-111.
13. Пилипенко ВА, Комаров ФФ, Солодуха ВА, Горушко ВА. Структурно-фазовые переходы в системе Pt – Si при быстрой термообработке. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2020;64(2):238–244. DOI: 10.29235/1561-8323-2020-64-2-238-244.
14. Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Комаров ФФ, Горушко ВА. Электронно-микроскопические исследования системы Pt – Si при ее быстрой термообработке. *Доклады БГУИР*. 2020;18(3):88–96. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-88-96.
15. Соловьёв ЯА, Пилипенко ВА, Гайдук ПИ. Структура и морфология слоев  $\text{CrSi}_2$ , сформированных при быстрой термообработке. *Доклады БГУИР*. 2020;18(4):71–79. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-4-71-79.
16. Соловьёв ЯА, Пилипенко ВА, Гайдук ПИ. Формирование дисилицида хрома при быстрой термической обработке в режиме теплового баланса. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. 2020;3:179–185.
17. Пилипенко ВА, Соловьёв ЯА, Гайдук ПИ. Формирование силицида никеля быстрой термообработкой в режиме теплового баланса. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2021;65(1):111–118. DOI: 0.29235/1561-8323-2021-65-1-111-118.
18. Kuznetsova T, Lapitskaya V, Solovjov Ja, Chizhik S, Pilipenko V, Aizikovich S. Properties of  $\text{CrSi}_2$  layers obtained by rapid heat treatment of Cr film on silicon. *Nanomaterials*. 2021;11(7):1734. DOI: 10.3390/nano11071734.
19. Достанко АП, Аваков СМ, Голосов ДА, Емельянов ВВ, Завадский СМ, Колос ВВ и др. *Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники*. Достанко АП, редактор. Минск: Беларуская навука; 2020. 260 с.
20. Пилипенко ВА, Солодуха ВА, Ковальчук НС, Соловьёв ЯА, Шестовский ДВ, Жигулин ДВ. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al – Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами Al – поликремний. *Доклады БГУИР*. 2022;20(7):20–27. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-7-20-27.

## References

1. Pilipenko VA. *Bystrye obrabotki v tekhnologii SBIS* [Rapid thermal treatments in VLSI technology]. Minsk: Publishing Center of the Belarusian State University; 2004. 531 p. Russian.
2. Poate JM, Tu KN, Mayer JW, editors. *Thin films: interdiffusion and reactions*. New York: John Wiley and Sons; 1978. X, 578 p. Russian edition: Poate J, Tu K, Mayer J, editors. *Tonkie plenki: vzaimnaya diffuziya i reaktsii*. Moscow: Mir; 1982. 576 p.
3. Mogab C, Frazer D, Fichtner W, Parrillo L, Marcus R, Steidel C, et al. *Tekhnologiya SBIS. Kniga 2* [VLSI technology. Book 2]. Sze C, editor. Moscow: Mir; 1986. 453 p. Russian.
4. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA. Rapid thermal treatment modes of the Pt – Si system for formation of platinum silicide. *Doklady BGUIR*. 2018;8:88–92. Russian.
5. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA, Filipenyva VA. The impact of formation modes of platinum silicide by the quick heat treatment on Schottky diodes parameters. *Doklady BGUIR*. 2019;1:62–67. Russian.
6. Anishchik VM, Harushka VA, Pilipenko UA, Poniariadov VV, Saladukha VA. Conductivity of platinum silicide films formed with application of rapid thermal treatment. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;1:27–31. Russian.
7. Belyaev AE, Boltovets NS, Klad'ko VP, Safryuk-Romanenko NV, Lubchenko AI, Sheremet VN, et al. Features of the temperature dependence of the specific contact resistance of diffusion silicon structures Au – Ti – Pd –  $n^+$  –  $n$ -Si. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2019;53(4):485–492. Russian. DOI: 10.21883/FTP.2019.04.47445.9012.
8. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA, Komarov FF, Milchanin OV. Formation of platinum silicide layers during the rapid thermal processing of the platinum – silicon system: structural-phase changes. *High Temperature Material Processes*. 2019;23(3):195–208. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v23.i3.10.
9. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA, Kupchishin AN, Komarov FF, Milchanin OV. Formation of platinum silicide during rapid thermal processing of the platinum – silicon system: microstructure and electrophysical characteristics. *High Temperature Material Processes*. 2019;23(3):255–273. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2019031214.
10. Solovjov JaA, Pilipenko VA. Effect of rapid thermal treatment conditions on electrophysical properties of chromium thin films on silicon. *Doklady BGUIR*. 2019;7–8:157–164. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-157-164.
11. Solovjov JaA, Pilipenko VA. Effect of rapid thermal treatment temperature on electrophysical properties of nickel films on silicon. *Doklady BGUIR*. 2020;18(1):81–88. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-1-81-88.
12. Saladukha VA, Pilipenko VA, Komarov FF, Gorushko VA. Influence of time modes of thermal treatment on Pt – Si system microstructure. *Doklady BGUIR*. 2020;18(2):105–111. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-2-105-111.

13. Pilipenka UA, Komarov FF, Saladukha VA, Harushka VA. Structural-phase junctions in the system of Pt – Si during rapid thermal treatment. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2020;64(2):238–244. Russian. DOI: 10.29235/1561-8323-2020-64-2-238-244.
14. Saladukha VA, Pilipenko VA, Komarov FF, Gorushko VA. Electron-microscope investigations of the Pt – Si system during its rapid thermal treatment. *Doklady BGUIR*. 2020;18(3):88–96. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-88-96.
15. Solovjov JaA, Pilipenko VA, Gaiduk PI. Structure and morphology of CrSi<sub>2</sub> layers formed by rapid thermal treatment. *Doklady BGUIR*. 2020;18(4):71–79. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-4-71-79.
16. Solovjov JaA, Pilipenko VA, Gaiduk PI. Chromium disilicide formation during rapid thermal treatment in thermal balance regime. *Proceedings of Francisk Skorina Gomel State University*. 2020;3:179–185. Russian.
17. Pilipenko VA, Solovjov JaA, Gaiduk PI. Nickel silicide formation with rapid thermal treatment in the heat balance mode. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2021;65(1):111–118. Russian. DOI: 0.29235/1561-8323-2021-65-1-111-118.
18. Kuznetsova T, Lapitskaya V, Solovjov Ja, Chizhik S, Pilipenko V, Aizikovich S. Properties of CrSi<sub>2</sub> layers obtained by rapid heat treatment of Cr film on silicon. *Nanomaterials*. 2021;11(7):1734. DOI: 10.3390/nano11071734.
19. Dostanko AP, Avakov SM, Golosov DA, Emel'yanov VV, Zavadskii SM, Kolos VV, et al. *Innovatsionnye tekhnologii i oborudovanie submikronnoi elektroniki* [Innovative technologies and equipment of submicron electronics]. Dostanko AP, editor. Minsk: Belaruskaja navuka; 2020. 260 p. Russian.
20. Pilipenko VA, Solodukha VA, Kovalchuk NS, Solovjov JaA, Shestovski DV, Zhyhulin DV. Thermal load influence during the formation of Al – Al contacts on the electrical parameters of the integrated circuits with aluminum – polysilicon contacts. *Doklady BGUIR*. 2022;20(7):20–27. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-7-20-27.

Получена 19.04.2023 / исправлена 10.05.2023 / принята 11.05.2023.  
Received 19.04.2023 / revised 10.05.2023 / accepted 11.05.2023.

---

#### Авторы:

**Владимир Александрович Пилипенко** – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы»<sup>1)</sup>, профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета<sup>2)</sup>.

**Наталья Станиславовна Ковальчук** – кандидат технических наук, доцент; заместитель генерального директора, главный инженер.

**Дмитрий Владимирович Жигулин** – начальник сектора физико-технического анализа государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

**Дмитрий Викторович Шестовский** – инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов.

**Виктор Михайлович Анищик** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

**Владимир Васильевич Понарядов** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий учебной лабораторией кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

#### Authors:

**Uladzimir A. Pilipenka**, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering), full professor; deputy director for scientific development at the state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems»<sup>a</sup>, and professor at the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics<sup>b</sup>.

office@bms.by

**Natalya S. Kovalchuk**, PhD (engineering), docent; deputy general director and chief engineer.

**Dmitry V. Zhyhulin**, head of the sector of physical and technical analysis, state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems».

zhygulin@mail.ru

**Dmitry V. Shestovski**, engineer-technologist at the department of advanced technological processes.

dshestovski@integral.by

<https://orcid.org/0000-0002-4259-3276>

**Victor M. Anishchik**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

**Vladimir V. Poniariadov**, PhD (physics and mathematics), docent; head of the training laboratory, department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

ponariadov@bsu.by