
ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

SEMICONDUCTOR PHYSICS AND ENGINEERING

УДК 621.382

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЯ С ПОЛИКРЕМНИЕМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА МЕТОДАМИ ДЛИТЕЛЬНОЙ И БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТОК

**В. А. ПИЛИПЕНКО^{1), 2)}, Н. С. КОВАЛЬЧУК¹⁾, Д. В. ЖИГУЛИН¹⁾,
Д. В. ШЕСТОВСКИЙ¹⁾, В. М. АНИЩИК²⁾, В. В. ПОНАРЕДОВ²⁾**

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

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Установлено, что формирование омического контакта между алюминием и поликремнием протекает за счет взаимной диффузии алюминия в поликремний и кремния в алюминий. Показано, что их диффузия в основном протекает по межзеренной области как в пленке поликремния, так и в пленке алюминия. Определены коэффициенты диффузии алюминия в поликремний и кремния в алюминий при температуре термообработки 450 °С, используемой при создании полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Отмечено, что диффузионные процессы подчиняются эффекту Киркендалла, приводящему к смещению межфазной границы алюминий – поликремний к поверхности пленки двуокиси кремния вплоть до полного растворения поликремния в алюминии. Образование конгломератов поликремния происходит при остывании пленки алюминия за счет выделения из нее на поверхность пленки SiO₂ кремния. Выделение кремния начинается в местах расположения тройных точек (стыков трех зерен) в структуре пленки алюминия, поскольку из-за большой межзеренной области подвижность атомов кремния в них максимальна. В дальнейшем данные места становятся центрами сегрегации кремния, что и приводит к образованию конгломератов поликремния в пленке алюминия. В отличие от длительной термообработки применение быстрой термообработки не вызывает формирования таких конгломератов, а диффузионные процессы мало изменяют границу раздела алюминий – поликремний из-за короткого времени температурного воздействия.

Ключевые слова: диффузия; межзеренная область; граница раздела алюминий – поликремний; коэффициент диффузии; конгломерат поликремния; быстрая термообработка; длительная термообработка; растровая электронная микроскопия.

Образец цитирования:

Пилипенко ВА, Ковальчук НС, Жигулин ДВ, Шестовский ДВ, Анищик ВМ, Понарядов ВВ. Механизм взаимодействия алюминия с поликремнием при формировании омического контакта методами длительной и быстрой термообработок. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2024;1:42–48. EDN: FPDZZZ

For citation:

Pilipenka UA, Kovalchuk NS, Zhyhulin DV, Shestovski DV, Anishchik VM, Ponariadov VV. Mechanism of interaction of aluminium with polysilicon when forming an ohmic contact by methods long and rapid heat treatments. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024;1:42–48. Russian. EDN: FPDZZZ

Сведения об авторах см. на с. 48.

Information about the authors see p. 48.

MECHANISM OF INTERACTION OF ALUMINIUM WITH POLYSILICON WHEN FORMING AN OHMIC CONTACT BY METHODS LONG AND RAPID HEAT TREATMENTS

U. A. PILIPENKA^{a, b}, N. S. KOVALCHUK^a, D. V. ZHYHULIN^a,
D. V. SHESTOVSKI^a, V. M. ANISHCHIK^b, V. V. PONARIADOV^b

^a«Integral» – Holding Management Company, 121a Kazinka Street, Minsk 220108, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

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

It has been established that the formation of ohmic contact between aluminium and polysilicon occurs due to the mutual diffusion of aluminium into polysilicon and silicon into aluminium. It is shown that their diffusion mainly occurs through the intergranular space in both the polysilicon film and the aluminium film. The diffusion coefficients of aluminium in polysilicon and silicon in aluminium were determined at a heat treatment temperature of 450 °C, used in the creating of semiconductor devices and integrated circuits. It is noted that diffusion processes obey the Kirkendall effect, leading to a displacement of the aluminium – polysilicon interface to the surface of the silicon dioxide film until the complete dissolution of polysilicon in aluminium. The formation of polysilicon conglomerates occurs when the aluminium film cools due to the release of silicon from it onto the surface of the SiO₂ film. The precipitation of silicon begins at the locations of triple points (the junction of three grains) in the structure of the aluminium film, since due to their large intergranular space, the mobility of silicon atoms in them is maximum. Subsequently, these places become centers of silicon segregation, which leads to the formation of polysilicon conglomerates in the aluminium film. In contrast to long heat treatment, the use of rapid heat treatment does not lead to the formation of such conglomerates, and diffusion processes little change the aluminium – polysilicon interface due to the short time of exposure to temperature.

Keywords: diffusion; intergranular space; aluminium – polysilicon interface; diffusion coefficient; silicon conglomerate; rapid heat treatment; long heat treatment; scanning electron microscopy.

Введение

Важным вопросом при создании полупроводниковых приборов и интегральных микросхем высокой степени интеграции и быстродействия является процесс металлизации. Он состоит в соединении определенным образом активных и пассивных элементов на одном кристалле. Основным моментом при этом является формирование надежных омических контактов к мелкозалегающим *p*–*n*-переходам биполярных транзисторов, сток-истоковым областям КМОП-транзисторов, низко- и высоколегированному поликремнию, а также контактов между несколькими слоями металлизации. Наиболее полно противоречивым требованиям, предъявляемым к материалу металлизации, отвечает алюминий [1–3].

Для обеспечения низкого контактного сопротивления при формировании контакта между различными уровнями разводки полупроводниковых приборов осуществляют длительную термическую или импульсную фотонную обработку системы алюминий – кремний при температуре 450–510 °C в течение 6–30 мин или 3–7 с соответственно [4]. Если имеющиеся литературные данные о процессах и механизмах формирования омических контактов между алюминием и кремнием, а также между слоями алюминиевой металлизации носят исчерпывающий характер [4–10], то аналогичные данные относительно контактов между алюминием и поликремнием практически отсутствуют.

Материалы и методы исследования

Для понимания механизмов взаимодействия алюминия с поликремнием при создании между ними омического контакта использовались результаты, полученные в работе [11]. Для дополнительного исследования границы раздела алюминий – поликремний до и после длительной и быстрой термообработки с поверхности образцов химическим травлением удалялась пленка алюминия и проводился анализ поверхности пленки поликремния на растровом электронном микроскопе (РЭМ) S-4800 (Hitachi, Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax-200 (Bruker, Германия).

Результаты и их обсуждение

Как следует из работы [11], длительная термообработка структуры Al/poly-Si/SiO₂/Si при температуре 450 °C в течение 20 мин приводит к полному растворению поликремния в алюминии с последующей сегрегацией кремния на поверхности двуокиси кремния и образованием конгломератов поликремния при остывании пленки алюминия. Для объяснения данного процесса будем учитывать тот факт, что взаимодействие алюминия с поликремнием сопровождается потоком атомов кремния к межфазной границе

алюминий – поликремний и потоком атомов алюминия в противоположном направлении. Это приводит к их диффузионному перераспределению как в алюминии, так и в поликремнии. Поскольку структура этих пленок является поликристаллической, то диффузионные процессы в них идут в основном по межзеренной области, а следовательно, протекают ускоренно [12]. Учитывая малую растворимость кремния в алюминии и алюминия в поликремнии, это должно приводить к их более высокой растворимости в межзеренной области и глубокой диффузии по толщине пленок в широком диапазоне температур.

Для подтверждения предположения о высокой растворимости кремния в межзеренной области пленки алюминия изучалась поверхность поликремния в исходной структуре Al/poly-Si/SiO₂/Si после удаления с нее пленки алюминия. Поскольку магнетронное напыление пленки алюминия на структуру poly-Si/SiO₂/Si проводится при температуре ~300 °С, то можно предположить, что кремний диффундирует по межзеренной области, чему способствует мелкозернистая структура поликремния. Так как размер зерен пленки поликремния не превышает 100 нм, а размер зерен пленки алюминия составляет 0,3–1,0 мкм, то площадь межзеренной области для поликремния будет значительно большей, чем для алюминия. Если учесть, что межзеренная область характеризуется высокой концентрацией дефектов и координационно-ненасыщенных связей, являющихся ловушками для диффундирующих элементов, то благодаря обменному механизму захвата происходит высвобождение атомов алюминия (кремний замещает алюминий) в пленке алюминия и атомов кремния (алюминий замещает кремний) в пленке поликремния. Данный процесс будет иметь место как при напылении пленки алюминия на структуру poly-Si/SiO₂/Si, так и при термообработке полученной структуры Al/poly-Si/SiO₂/Si. Обменный механизм захвата будет осуществляться до тех пор, пока все ловушки не будут заполнены и процесс не придет к своему насыщению. Это означает, что после удаления алюминия с поверхности поликремния распределение захваченного на ловушки кремния будет соответствовать картине распределения границ зерен в пленке алюминия. Анализ изображения такой поверхности, полученного с помощью РЭМ (рис. 1), полностью подтверждает модель взаимной диффузии алюминия и кремния в указанной выше системе.

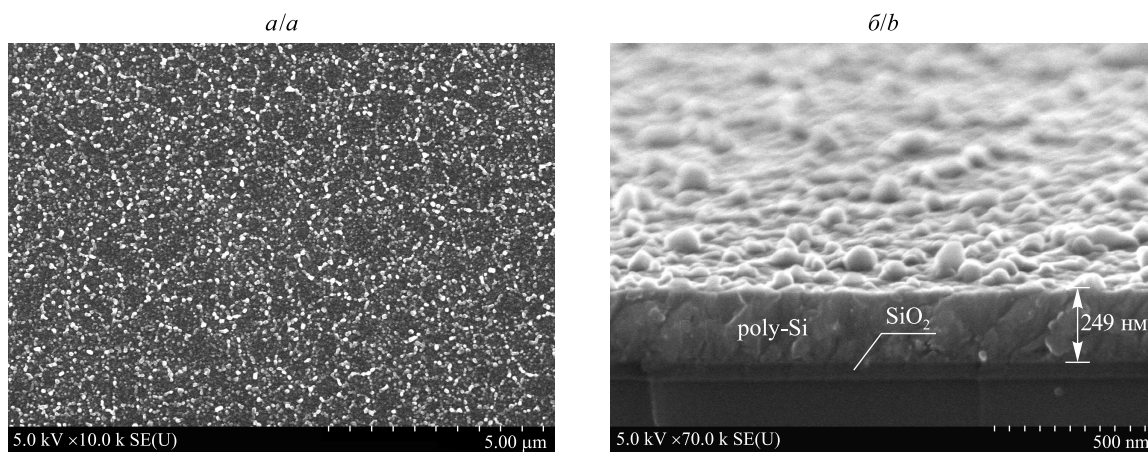


Рис. 1. РЭМ-изображение поверхности поликремния в структуре Al/poly-Si/SiO₂/Si с удаленной пленкой алюминия сразу после ее напыления:

a – поверхность поликремния без наклона; *б* – поверхность поликремния с наклоном под углом 70°

Fig. 1. Scanning electron microscopy (SEM) image of a polysilicon surface in the Al/poly-Si/SiO₂/Si structure with the aluminium film removed immediately after its deposition:

a – polysilicon surface without tilt; *b* – polysilicon surface at an angle of 70°

Для понимания механизма полного растворения поликремния в алюминии с последующим образованием в нем конгломератов поликремния рассмотрим процесс взаимной диффузии в системе алюминий – поликремний при длительной термообработке (450 °С, 20 мин). Поскольку такой процесс должен сопровождаться смещением межфазной границы алюминий – поликремний в сторону двуокси кремния вплоть до достижения алюминием ее поверхности, то на первом этапе определим возможность протекания взаимной диффузии в данной системе.

Оценим коэффициенты диффузии кремния в алюминий и алюминия в поликремний с учетом того, что имеет место полное растворение поликремния в алюминии. В этом случае глубина диффузии кремния в алюминий будет соответствовать толщине пленки алюминия (~1,5 мкм), а глубина диффузии алюминия в поликремний – толщине пленки поликремния (0,25 мкм). Для вычисления коэффициентов диффузии (*D*) воспользуемся хорошо известным выражением, описывающим зависимость глубины диффузии (*h*) от времени термообработки (*t*) [13]:

$$h = 2(Dt)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Расчет по формуле (1) показал, что коэффициенты диффузии кремния в алюминий (D_{Si}) и алюминия в поликремний (D_{Al}) для системы алюминий – поликремний при формировании между ними омического контакта с учетом времени термообработки ($t = 20$ мин) составляют $D_{Si} = 4,6 \cdot 10^{-6}$ см²/с и $D_{Al} = 1,3 \cdot 10^{-7}$ см²/с. Как видно из результатов расчета, $D_{Si} \gg D_{Al}$, следовательно, согласно эффекту Киркендалла [8] межфазная граница алюминий – поликремний должна перемещаться в сторону двуокиси кремния вплоть до достижения алюминием ее поверхности, т. е. до полного растворения поликремния в алюминии.

Реализация данного процесса обусловлена, с одной стороны, достаточной концентрацией подвижных атомов кремния и алюминия в межзеренной области пленок поликремния и алюминия соответственно, а с другой стороны, наличием свободной межзеренной области в пленке алюминия.

Выполнение первого условия объясняется значительно большей площадью межзеренной области в поликремнии, а следовательно, и большим количеством ловушек для алюминия. В процессе взаимной диффузии алюминия и кремния происходит рост концентрации свободного кремния в этой области за счет захвата им алюминия с последующей диффузией кремния в алюминий. Учитывая, что в межзеренной области поликремния, кроме кремния, высвобождающегося из-за захвата алюминия, имеется значительное количество подвижных атомов кремния, их общая концентрация будет достаточно высокой для быстрого протекания процесса растворения поликремния в алюминии.

Выполнение второго условия обусловлено тем, что вышеперечисленные процессы, связанные со взаимной диффузией в структуре Al/poly-Si/SiO₂/Si, идут по всему объему пленок поликремния и алюминия. Необходимо учитывать два обстоятельства: наличие в пленке алюминия тройных точек, в которых имеется большее свободное пространство [14], чем в межзеренной области в точке соприкосновения двух зерен, и большую толщину пленки алюминия (1,5 мкм) по сравнению с толщиной пленки поликремния (0,25 мкм). Эти два обстоятельства обеспечивают достаточное место для исключения насыщения алюминия кремнием при температуре 450 °С, приводя к полному растворению поликремния в алюминии. Поскольку максимальная свободная площадь в межзеренной области находится в тройных точках, то и концентрация кремния в них будет максимальной.

Анализ диаграммы фазового равновесия системы алюминий – поликремний показывает, что при повышении температуры увеличивается растворимость кремния в алюминии, а при понижении температуры происходит интенсивное выделение кремния из алюминия [5]. Следует отметить, что имеет место неравномерное выделение кремния на поверхность пленки двуокиси кремния при остывании структуры Al/poly-Si/SiO₂/Si, которое связано с неравномерной растворимостью кремния при взаимодействии алюминия с поликремнием. Поскольку максимальная концентрация кремния наблюдается в тройных точках межзеренной области, где подвижность атомов примеси максимальна, то при понижении температуры нагрева выделение кремния начинается именно с этих мест. В дальнейшем они становятся зародышами для формирования конгломератов поликремния. Протекание вышеуказанных процессов при длительной термообработке структуры Al/poly-Si/SiO₂/Si подтверждают данные, приведенные в работе [11], а также скан структуры Al/poly-Si/SiO₂/Si (рис. 2).

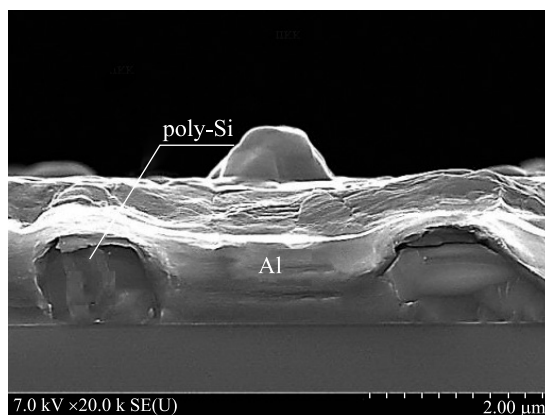


Рис. 2. РЭМ-изображение поперечного сечения структуры Al/poly-Si/SiO₂/Si после длительной термообработки (450 °С, 20 мин)

Fig. 2. SEM image of the cross section of the Al/poly-Si/SiO₂/Si structure after long heat treatment (450 °C, 20 min)

Совершенно иная картина наблюдается при использовании быстрой термообработки, обеспечивающей получение необходимых температур (450–510 °C) за 7 с при эффективном времени термообработки не более 2 с. Такой нагрев позволяет уменьшить время диффузионных процессов, ответственных за образование поликристаллических конгломератов в пленке алюминия, в 600 раз. Поскольку все описанные выше процессы носят чисто диффузионный характер, то следовало ожидать отсутствия образования конгломератов поликремния в алюминии при таком нагреве. Приведенные в работе [11] данные показывают, что при импульсном фотонном нагреве происходит незначительное растворение поликремния в алюминии без образования в нем конгломератов поликремния. Это подтверждают полученные методом РЭМ изображения поверхности поликремния в структуре Al/poly-Si/SiO₂/Si (рис. 3).

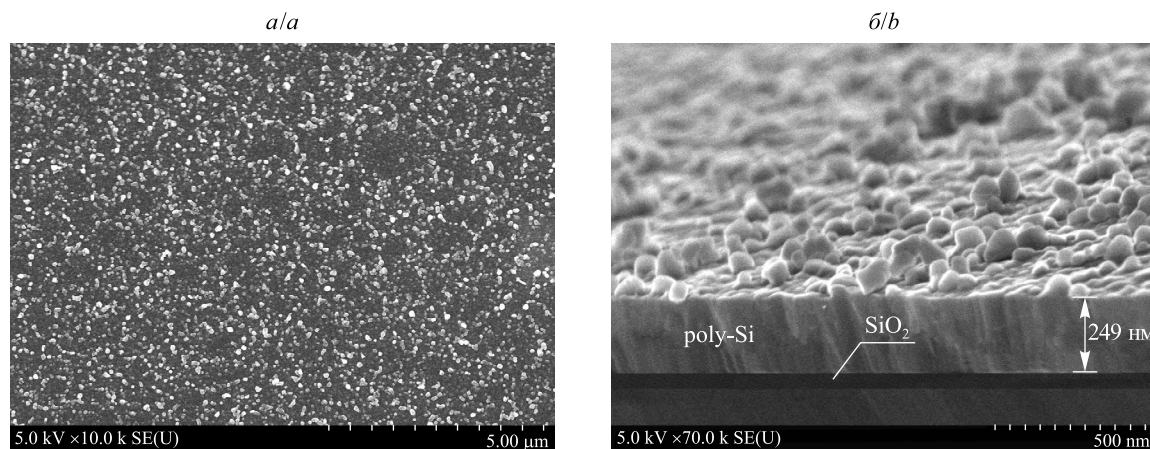


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности поликремния в структуре Al/poly-Si/SiO₂/Si с удаленной пленкой алюминия после быстрой термообработки (450 °C, 7 с):
а – поверхность поликремния без наклона; б – поверхность поликремния с наклоном под углом 70°

Fig. 3. SEM image of a polysilicon surface in the Al/poly-Si/SiO₂/Si structure with the aluminium film removed after rapid heat treatment (450 °C, 7 s):
a – polysilicon surface without tilt; b – polysilicon surface at an angle of 70°

Сопоставление микроструктуры поверхности поликремния до термообработки (см. рис. 1) с аналогичной микроструктурой после быстрой термообработки (см. рис. 3) показывает их полную идентичность, что подтверждает вывод о незначительных диффузионных процессах при ее проведении.

Заключение

Установлено, что формирование омического контакта между алюминием и поликремнием происходит за счет взаимной диффузии алюминия в поликремний и кремния в алюминий. При длительной термообработке данный процесс подчиняется эффекту Киркендалла, приводящему к смещению межфазной границы алюминий – поликремний к поверхности пленки двуокиси кремния вплоть до полного растворения поликремния в алюминии. Формирование конгломератов поликремния на поверхности SiO₂ протекает в местах расположения тройных точек в структуре пленки алюминия за счет выделения из нее кремния при остывании. Это приводит к образованию зародышей для формирования поликристаллических конгломератов кремния в результате его сегрегации в данных местах. Применение быстрой термообработки не вызывает образования таких конгломератов, а диффузионные процессы мало изменяют границу раздела алюминий – поликремний и не приводят к значительному растворению поликремния в алюминии из-за короткого времени температурного воздействия.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Достанко АП. *Технология интегральных схем*. Минск: Вышэйшая школа; 1982. 206 с.
3. Наливайко ОЮ, Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Колос ВВ, Белоус АИ, Челядинский АР и др. *Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Том 3*. Турцевич АС, редактор. Минск: Интегралполиграф; 2013. 783 с.
4. Пилипенко ВА. *Быстрые термообработки в технологии СБИС*. Минск: Издательский центр БГУ; 2004. 531 с.
5. Поут Дж, Ту К, Мейер Дж, редакторы. *Тонкие пленки: взаимная диффузия и реакции*. Москва: Мир; 1982. 576 с.

6. Пилипенко ВА, Молофеев ВМ, Пономарь ВН, Михнюк АН, Борздов ВМ. Моделирование морфологии пленок алюминия до и после различных видов термообработки. *Инженерно-физический журнал*. 2003;76(4):99–103.
7. Пилипенко ВА, Пономарь ВН, Горушко ВА. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки. *Инженерно-физический журнал*. 2003;76(4):95–98.
8. Пилипенко ВА, Пономарь ВН, Горушко ВА, Тарасик МИ, Янченко АМ. Улучшение термостабильности пленок алюминия и его сплавов на кремнии с использованием быстрой термообработки. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1, Физика. Математика. Информатика*. 1998;3:53–58.
9. Пилипенко ВА, Рожков ВВ, Горушко ВА. Модель взаимодействия кремния с алюминием при фотонной обработке. *Электронная техника. Серия 2, Полупроводниковые приборы*. 1990;3:24–28.
10. Буйко ЛД, Лесникова ВП, Пилипенко ВА, Рожков ВВ. Особенности взаимодействия системы Al – Si при термической и импульсной оптической обработках. *Электронная техника. Серия 6, Материалы*. 1984;2:16–19.
11. 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. DOI: 10.33581/2520-2243-2023-2-51-57.
12. Афонин НН, Логачева ВА. Модель взаимодиффузии при формировании тонких пленок металлов на монокристаллическом кремнии в условиях ограниченной растворимости компонентов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(1):129–135. DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/9063.
13. Мазель ЕЗ, Пресс ФП. *Планарная технология кремниевых приборов*. Москва: Энергия; 1974. 384 с.
14. Поletaев ГМ, Новоселова ДВ, Зоря ИВ, Старостенков МД. Исследование формирования избыточного свободного объема в тройных стыках границ зерен при кристаллизации на примере никеля. *Физика твердого тела*. 2018;60(5):846–850. DOI: 10.21883/FTT.2018.05.45775.062.

References

1. Mogab C, Fraser 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.
2. Dostanko AP. *Tekhnologiya integral'nykh skhem [Integrated circuit technology]*. Minsk: Vyshhejschaja shkola; 1982. 206 p. Russian.
3. Nalivaiko OYu, Solodukha VA, Pilipenko VA, Kolos VV, Belous AI, Chelyadinskii AR, et al. *Bazovye tekhnologicheskie protsessy izgotovleniya poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem na kremnii. Tom 3 [Basic technological processes for manufacturing semiconductor devices and integrated circuits on silicon. Volume 3]*. Turtsevich AS, editor. Minsk: Integralpoligraf; 2013. 783 p. Russian.
4. Pilipenko VA. *Bystrye termoobrabotki v tekhnologii SBIS [Rapid heat treatment in VLSI technology]*. Minsk: Publishing Centre of the Belarusian State University; 2004. 531 p. Russian.
5. Poate JM, Tu KN, Mayer JW, editors. *Thin films: interdiffusion and reactions*. New York: John Wiley and Sons; 1978. X, 578 p. (The Electrochemical Society series).
Russian edition: Poate J, Tu K, Mayer J, editors. *Tonkie plenki: vzaimnaya diffuziya i reaktsii*. Moscow: Mir; 1982. 576 p.
6. Pilipenko VA, Molofeev VM, Ponomar VN, Mikhnyuk AN, Borzdov VM. [Modelling the morphology of aluminum films before and after various types of heat treatment]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2003;76(4):99–103. Russian.
7. Pilipenko VA, Ponomar VN, Gorushko VA. [Controlling the properties of thin film systems using pulsed photonic processing]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2003;76(4):95–98. Russian.
8. Pilipenko VA, Ponomar VN, Gorushko VA, Tarasik MI, Yanchenko AM. Improvement of thermal stability of aluminum and aluminum alloy films on silicon using rapid thermal processing. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. 1998;3:53–58. Russian.
9. Pilipenko VA, Rozhkov VV, Gorushko VA. [Model of interaction between silicon and aluminum during photonic processing]. *Electronic Engineering. Series 2, Semiconductor Devices*. 1990;3:24–28. Russian.
10. Buiko LD, Lesnikova VP, Pilipenko VA, Rozhkov VV. [Features of the interaction of the Al – Si system during thermal and pulsed optical processing]. *Electronic Engineering. Series 6, Materials*. 1984;2:16–19. Russian.
11. Pilipenko UA, Kovalchuk NS, Zhyhulin DV, Shestovski DV, Anishchik VM, Poniariadov VV. Effect of long-term and rapid thermal treatments on the formation of the aluminium – polysilicon interface. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2023;2:51–57. Russian. DOI: 10.33581/2520-2243-2023-2-51-57.
12. Afonin NN, Logachova VA. A model of interdiffusion occurring during the formation of thin metal films on single-crystal silicon under conditions of limited solubility of the components. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(1):129–135. Russian. DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/9063.
13. Mazel EZ, Press FP. *Planarnaya tekhnologiya kremnievykh priborov [Planar silicon technology]*. Moscow: Ehnergiya; 1974. 384 p. Russian.
14. Poletaev GM, Novoselova DV, Zorya IV, Starostenkov MD. [Study of the formation of excess free volume at triple junctions of grain boundaries during crystallisation using the example of nickel]. *Fizika tverdogo tela*. 2018;60(5):846–850. Russian. DOI: 10.21883/FTT.2018.05.45775.062.

Получена 20.11.2023 / принята 28.11.2023.
Received 20.11.2023 / accepted 28.11.2023.

Авторы:

Владимир Александрович Пилипенко – доктор технических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор; заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикроанализ»¹⁾, профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета²⁾.

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

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

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, doctor of science (engineering), corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, full professor; deputy director for scientific development at the state centre «Belmicroanalysis»^a and professor at the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics^b.

office@bms.by

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

Dmitry V. Zhyhulin, head of the sector of physical and technical analysis, state centre «Belmicroanalysis».

zhygulin@mail.ru

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

dshestovski@integral.by

Viktor 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. Ponariadov, PhD (physics and mathematics), docent; head of the training laboratory, department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

ponariadov@bsu.by
