

Член-корреспондент В. А. Пилипенко¹, член-корреспондент Ф. Ф. Комаров²,
В. А. Солодуха¹, В. А. Горушко¹

¹Открытое акционерное общество «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

²Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СИСТЕМЕ Pt–Si ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Аннотация. В последние годы интерес к силицидам значительно возрос в связи с их большими потенциальными возможностями как материала низкоомных контактов и межсоединений металлизации кремниевых интегральных микросхем. В связи с этим появилась необходимость более пристального изучения термодинамических, электрических и структурных особенностей их формирования. Цель работы заключалась в исследовании влияния быстрой термической обработки на структурно-фазовые переходы в системе Pt–Si при формировании силицида платины. В качестве образцов использовались пленки Pt толщиной 43,7 нм, нанесенные на подложки монокристаллического кремния КЭФ 0.5 ориентации (111) путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,95 % на установке МРС 603 с криогенной откачкой до давления не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ Па. В качестве рабочей среды использовался аргон, чистота которого составляла 99,933 %. Быстрая термообработка проводилась в среде азота в диапазоне температур от 200 до 550 °С с шагом 50 °С и времени 7 с. Процесс взаимодействия платины с кремнием при обработке системы Pt–Si оценивался путем анализа РОР спектров. Показано, что в диапазоне температур $200 \text{ °С} \leq T \leq 300 \text{ °С}$ за 7 с процесса БТО на границе металлической пленки с подложкой происходит образование слоя Pt₂Si за счет диффузии атомов Pt в кремний через слой растущего силицида. Температуре $T = 300 \text{ °С}$ характерно полное использование пленки Pt за 7 с в процессе силицидообразования однофазной системы Pt₂Si. При $350 \text{ °С} \leq T < 450 \text{ °С}$ регистрируется формирование двухфазной системы Pt₂Si → PtSi, начиная от межфазной границы Si/Pt₂Si преимущественно за счет встречной диффузии атомов Si в слой Pt₂Si. Температуре БТО $T = 450 \text{ °С}$ соответствует образование термостабильной равновесной структуры PtSi по всей толщине силицида, что на 50–100 °С ниже и значительно быстрее, чем при длительной равновесной термообработке.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, кремниевая пластина, твердофазная рекристаллизация, силицид платины

Для цитирования: Структурно-фазовые переходы в системе Pt–Si при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 238–244. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-238-244>

Corresponding Member Uladzimir A. Pilipenko¹, Corresponding Member Fadey F. Komarov²,
Vitali A. Saladukha¹, Valiantsina A. Harushka¹

¹Holding Managing Company “Integral”, Minsk, Republic of Belarus

²A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

STRUCTURAL-PHASE JUNCTIONS IN THE SYSTEM OF Pt–Si DURING RAPID THERMAL TREATMENT

Abstract. In recent years the interest to silicides significantly rose relating to their huge potentialities as the material of the low-Ohm contacts and interconnections of metallization of the silicon integrated circuits. In view of this the necessity appeared to consider more extensively the thermal dynamic, electric and structural peculiarities of their formation. Purpose of the work was in investigation of influence of the rapid thermal treatment on the structural –phase junctions in the system of Pt–Si during formation of platinum silicide. As samples, the Pt films were used, 43.7 nm thick and applied on the substrates of the mono-crystal silicon KEF КЭФ 0.5 with orientation (111) by means of the magnetron sputtering of the platinum target with purity of 99.95 % on the unit MRS 603 with the cryogenic pumping to the pressure not worse, than $5 \cdot 10^{-5}$ Pa. As the operating medium, argon was used, whose purity constituted 99.933 %. Rapid thermal treatment was performed in the nitrogen medium within the temperature range from 200 to 550 °С with a step of 50 °С and the time period of 7 s. The process of interaction of platinum with silicon during treatment of the Pt–Si system was evaluated by means of the analysis of the RBS spectra. It is demonstrated, that within the temperature range of $200 \text{ °С} \leq T \leq 300 \text{ °С}$ during 7 s of the rapid thermal process on the boundary of the metal film with the substrate, formation takes place of the Pt₂Si layer owing to diffusion of the

Pt atoms into silicon via the layer of the growing silicide. The temperature $T = 300\text{ °C}$ is peculiar for the complete application of the Pt film during 7 s in process of the silicide formation of the single phase system of Pt_2Si . At $350\text{ °C} \leq T < 450\text{ °C}$ formation is registered of the double phase system of $\text{Pt}_2\text{Si} \rightarrow \text{PtSi}$, starting from the inter-phase boundary of $\text{Si}/\text{Pt}_2\text{Si}$ predominantly owing to the opposite diffusion of the Si atoms into the layer of Pt_2Si . The temperature of the rapid thermal treatment $T = 450\text{ °C}$ marks formation of the thermally stable balanced structure of PtSi along the entire silicide thickness, which is 50–100 °C lower and considerably more rapid, than during the long-term balanced thermal treatment.

Keywords: rapid thermal treatment, silicon wafer, solid phase recrystallization, platinum silicide

For citation: Pilipenka U. A., Komarov F. F., Saladukha V. A., Harushka V. A. Structural-phase junctions in the system of Pt–Si during rapid thermal treatment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 238–244 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-238-244>

Введение. Современные тенденции развития микро- и нанoeлектроники, повышение степени интеграции, создание изделий с субмикронными размерами требуют разработки новых технологических процессов, позволяющих снизить время и тепловую нагрузку как на полупроводниковую подложку, так и на создаваемые на ней функциональные слои. Это может быть реализовано путем замены в технологическом процессе изготовления изделий электронной техники длительных термических обработок на быстрые высокотемпературные операции с применением световых источников нагрева. В настоящее время повышенное внимание уделяется контактными системам при создании изделий силовой электроники, работающих в жестких режимах эксплуатации, таких как диоды Шоттки, основанные на использовании свойств выпрямляющего контакта металл–полупроводник. В качестве материала барьерного слоя в диодах Шоттки широкое распространение получили слои силицида платины, формируемые при термической обработке путем твердофазной реакции пленок чистой платины, нанесенных на кремниевую подложку.

Силициды платины перспективны при формировании самосовмещенных контактов для субмикронной и наноразмерной элементной базы электроники [1]. В последние годы особый интерес вызывает применение PtSi в качестве контактов стока и истока в полевых транзисторах. Сочетание хорошей селективности травления по отношению к силициду платины непрореагировавшего после термообработки металла делает PtSi подходящим кандидатом для следующего поколения рМОП технологий.

В настоящее время имеется множество способов создания тонкопленочных силицидов, среди которых широкое применение нашел метод твердофазного синтеза [1–4], так как он обеспечивает получение стабильных слоев силицидов с оптимальной стехиометрией и, следовательно, минимальным для данного материала сопротивлением и требует для проведения отжига гораздо меньших температур, чем при прочих методах. Последнее условие важно в случае формирования контактов к ионно-имплантированным структурам.

Применение длительных термообработок для его формирования обладает рядом недостатков, основным из которых является образование развитого микрорельефа на границе раздела силицид–кремний [3; 4], избежать которого можно путем уменьшения времени проведения процесса твердофазного синтеза. Это может быть достигнуто использованием быстрой термической обработки [5; 6]. Однако процесс формирования силицида платины при такой обработке недостаточно изучен. Данная работа посвящена исследованию влияния быстрой термической обработки на структурно-фазовые переходы в системе Pt–Si при формировании силицида платины.

Материалы и методы исследования. Для изучения структурно-фазовых изменений при формировании слоев силицида платины использовались пленки платины толщиной 43,7 нм и чистотой не хуже 99,95 %, осажденные на подложку монокристаллического кремния КЭФ 0,5 ориентации (111). Формирование силицида платины проводилось путем быстрой термической обработки в среде азота в течение 7 с в диапазоне температур от 200 до 550 °C. Для сравнения использовался силицид платины, сформированный стандартным методом с применением длительной термической одностадийной ($T = 550\text{ °C}$, $t = 30$ мин) и двухстадийной ($T = 350\text{ °C}$, $t = 180$ мин первая стадия и $T = 550\text{ °C}$, $t = 30$ мин вторая стадия) обработок в среде азота. Влияние температуры БТО на процесс твердофазного синтеза PtSi оценивалось путем анализа РОР спектров (рис. 1, 2) и рентгеноструктурного анализа (рис. 3) образцов Pt–Si после различных режимов отжига.

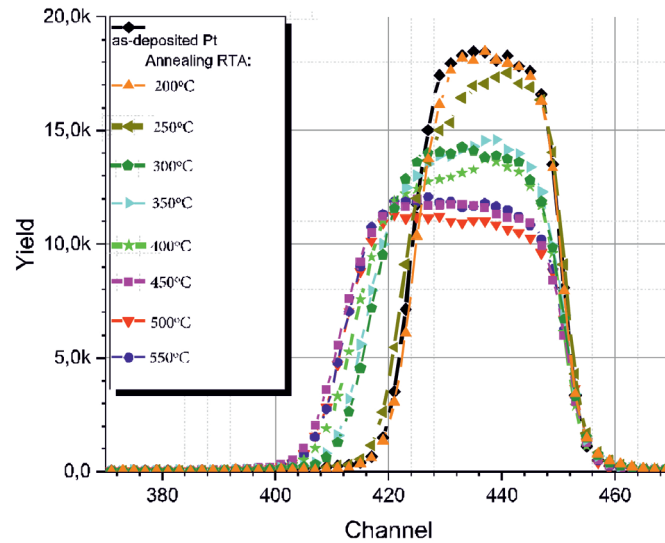


Рис. 1. POP спектры ионов гелия с энергией 1,4 МэВ от пленки платины на кремнии после нанесения и быстрой термообработки

Fig. 1. RBS spectra of helium ions with energy of 1,4 MeV from the platinum film on silicon after application and rapid thermal treatment

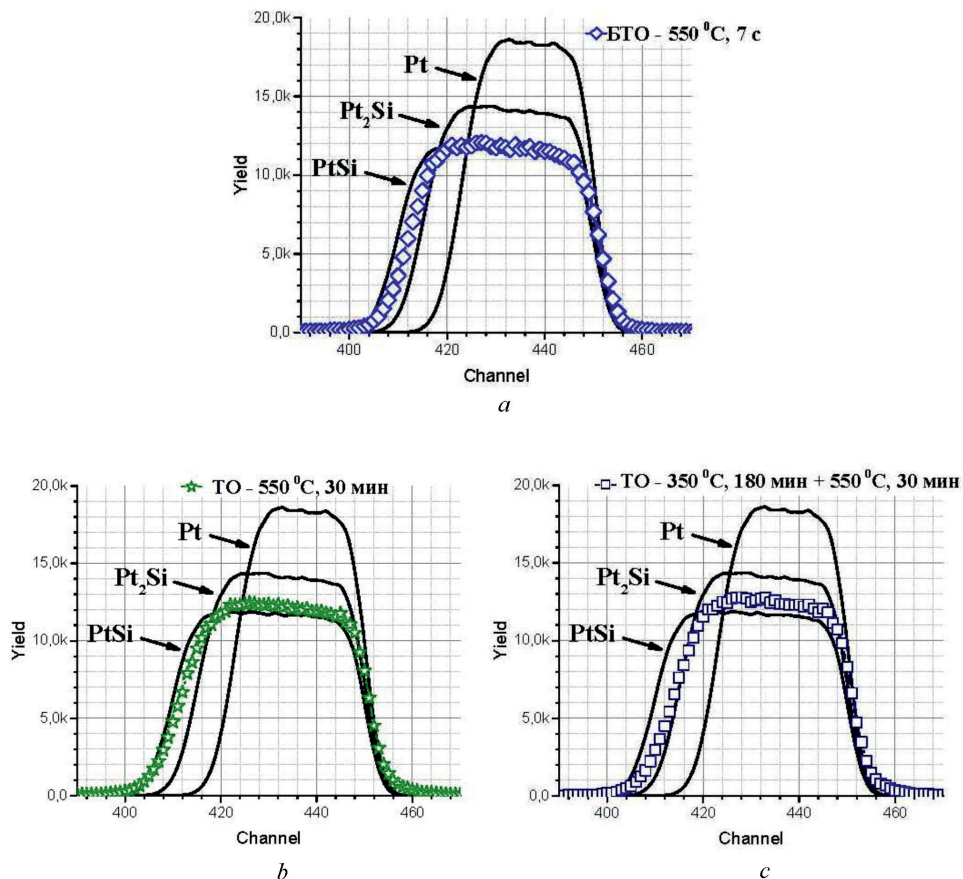


Рис. 2. POP спектры ионов гелия с энергией 1,4 МэВ от пленки платины на кремнии после нанесения, быстрой и длительной термообработки: *a* – быстрый термический отжиг пленки Pt при 550 °C в течение 7 с; *b* – одностадийный отжиг при 550 °C в течение 30 мин; *c* – двухстадийный отжиг при 350 °C в течение 180 мин и 550 °C в течение 30 мин

Fig. 2. RBS spectra of helium ions with energy of 1,4 MeV from the platinum film of silicon after application, rapid and long thermal treatment: *a* – rapid thermal treatment of the Pt film at 550 °C during 7 s; *b* – single stage annealing at 550 °C during 30 min; *c* – double stage annealing at 350 °C during 180 min and at 550 °C during 30 min

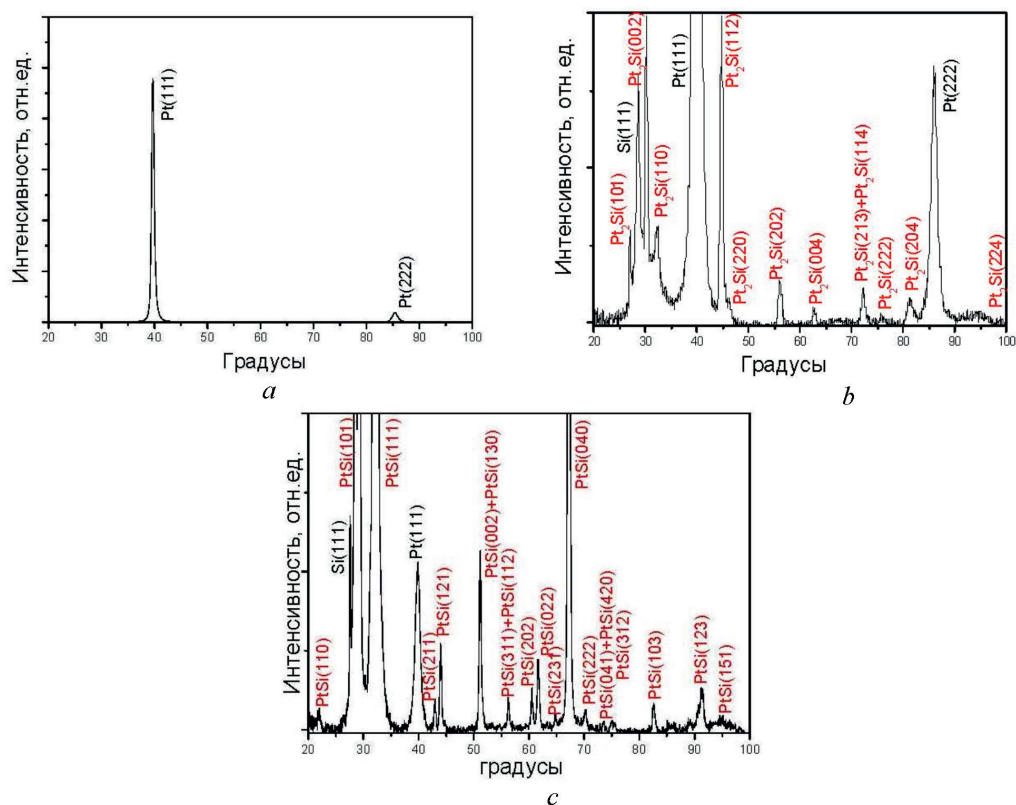


Рис. 3. Рентгенограммы слоев Pt на кремнии до и после БТО: *a* – исходная пленка Pt; *b* – БТО пленки Pt при 250 °С; *c* – БТО пленки Pt при 450 °С

Fig. 3. X-Ray images of the Pt layers on silicon before and after rapid thermal treatment: *a* – initial film of Pt; *b* – rapid thermal treatment of the Pt film at 250 °C; *c* – rapid thermal treatment of the Pt film at 450 °C

Результаты и их обсуждение. На основании анализа спектров РОР следует, что диффузионное перемешивание платины на границе с кремниевой подложкой начинается уже при температуре 200 °С, в то время как при длительной термической обработке данный процесс начинается при $T = 200\text{--}220$ °С и времени ее проведения вплоть до 480 мин [6].

Повышение температуры БТО до 250 °С приводит к частичному использованию пленки Pt для формирования на границе раздела с Si тонкого слоя фазы Pt₂Si, в результате чего на кремниевой подложке образуется двухслойная система Pt–Pt₂Si. При этом слой у границы раздела с кремнием содержит 34 % Si и 66 % Pt. По мере удаления от границы раздела концентрация кремния и платины изменяется, достигая на поверхности величин 9 и 91 % соответственно. Данный результат полностью подтверждается рентгеноструктурными исследованиями рассматриваемой системы, которые показывают наличие в образце пиков от кристаллических плоскостей, соответствующих фазам как Pt₂Si, так и Pt (рис. 3, *b*).

Дальнейшее повышение температуры БТО до 300 °С обеспечивает полный переход пленки Pt в слой силицида фазы Pt₂Si, который содержит, как показывает расчет, 39 % Si и 61 % Pt. При длительной термической обработке такой переход происходил при температуре 260–280 °С и времени 240 мин [6], т. е. при БТО данный процесс идет гораздо быстрее. Столь быстрая диффузия Pt в Si через зарождающуюся фазу Pt₂Si при таких температурах может осуществляться только по ее межзеренному пространству, увеличивая коэффициент диффузии атомов металла по сравнению с диффузией в объеме зерен. Так как размер зерен Pt₂Si при БТО очень мал и составляет около 14 нм, то площадь ее межзеренного пространства очень велика, что и обеспечивает быструю диффузию Pt через слой Pt₂Si к границе раздела с Si и рост ее толщины. Это пол-

ностью соответствует основному правилу силицидообразования, а именно, образованию при низких температурах силицида, обогащенного металлом. При соответствующих кинетических условиях образование такого силицида продолжается, пока не израсходуется весь металл. Это указывает на то, что при БТО, как и при длительной термообработке, основным диффундирующим компонентом при таких температурах являются атомы платины.

Следует отметить, что отсутствие при этом фазы Pt_3Si , энергия образования которой близка к энергии образования Pt_2Si , по-видимому, связано с тем, что зарождение ячейки Pt_2Si в кинетическом отношении более предпочтительно из-за меньшего числа атомов Pt, включаемых в процесс ее формирования и роста в отличие от ячейки Pt_3Si .

Следует отметить также, что фаза $PtSi$ не начинает формироваться до завершения формирования слоя Pt_2Si , т. е. пока слой платины целиком не превратится в Pt_2Si .

Для образования силицида платины, обогащенного металлом при столь низких температурах, доминирующим требованием является обеспечение поступления атомов кремния к месту реакции за счет разрыва его связей с кристаллической решеткой кремниевой матрицы. Так как данный разрыв не может происходить за счет энергии фононов из-за достаточно низкой температуры, то, скорее всего, здесь действует междоузельный механизм, согласно которому разрыву связей Si–Si способствуют атомы металла, находящиеся в междоузлиях кремния. Данный механизм действует только для металлов, способных при низких температурах диффундировать по междоузлиям в кремнии, в нашем случае это быстродиффундирующие атомы платины. При переходе атома Pt в междоузлие в Si (основным диффундирующим элементом является Pt) число ближайших соседей атомов кремния растет, оставляя в пленке платины соответствующие вакансии. Такое увеличение ближайших атомов кремния приводит к ослаблению их связи из-за обмена зарядом. Можно предположить также, что ослаблению данных связей способствует и фотон-фононное взаимодействие, имеющее место при нагреве системы Pt–Si импульсным световым потоком. В целом ослабление можно рассматривать как переход от ковалентного типа связи к металлическому, что в зонной теории соответствует образованию дырки в валентной зоне. Поскольку она в силу принципа неопределенности не локализована на какой-либо связи, то разрыв связи конкретного атома Si вблизи границы раздела происходит под действием на него фотонов и нескольких междоузельных атомов Pt. Так как свободная энергия границы Pt–Si больше, чем решетки кремния, то на данной границе концентрация междоузельных атомов Pt значительно выше. Это и обеспечивает возможность освобождения атомов Si при температурах около 250 °C. Эффект фотонной активации синтеза пленок силицидов наблюдался на примере формирования гетеросистемы (111) Si–Ni–Pt [7], однако механизмы активации процессов там не обсуждались.

После перехода всей пленки металла в силицид платины, обогащенный металлом, свободных атомов Pt, переходящих в междоузлия, не остается и рост останавливается. Наличие фотонного воздействия при данном механизме образования Pt_2Si вызывает, как показано выше и отмечалось в [8], значительное уменьшение времени его образования.

Рост температуры до 350 °C приводит к зарождению на границе пленки с подложкой фазы $PtSi$ за счет вступления в реакцию свободных атомов Pt с Si. При этом формируется пленка, имеющая двухфазную структуру $PtSi$ – Pt_2Si . На границе раздела с кремнием образуется фаза $PtSi$, что связано с достаточным количеством атомов Si и Pt для формирования этого силицида, благодаря потоку атомов Si из подложки. В пленке Pt_2Si , расположенной ближе к поверхности системы, атомов кремния остается недостаточно для образования фазы $PtSi$ (35 % Si и 65 % Pt) из-за достаточно низкого коэффициента диффузии их через растущий слой $PtSi$.

С повышением температуры до 400 °C данная пленка по-прежнему представляет двухфазную систему $PtSi$ – Pt_2Si , однако концентрация атомов кремния в приповерхностном слое увеличивается до 42 %, а платины уменьшается до 58 %, что способствует увеличению толщины слоя $PtSi$ и уменьшению слоя Pt_2Si .

Нагрев пленки Pt до 450 °C обеспечивает образование однофазной пленки $PtSi$, имеющей в своем объеме небольшой избыток атомов Si, что связано, по-видимому, с его повышенной диф-

фузией в пленку Pt при данной температуре. Так, данная пленка содержит 55 % атомов Si и 45 % атомов Pt. Этот результат полностью подтверждается рентгеноструктурными исследованиями, которые свидетельствуют о наличии в данном образце только пиков, соответствующих кристаллическим плоскостям фазы PtSi, и отсутствию пиков от плоскостей фазы Pt₂Si (рис. 3, с). Наличие неинтенсивного пика от {111}-плоскостей кубической фазы платины, возможно, связано с ее наличием в виде островковых остатков на поверхности сформированного моносилцида платины. Расчеты, проведенные на основании рентгенограммы, показывают, что содержание PtSi составляет 99,3 %, а Pt – 0,7 %.

Дальнейшее увеличение температуры до 500 и 550 °C не приводит к существенным изменениям фазового состава сформированной пленки силицида платины, который практически полностью совпадает с составом, формируемым при 450 °C. Та же картина наблюдается в диапазоне температур 450–550 °C при увеличении длительности процесса БТО до 20 с. Это означает, что процесс взаимодействия кремния с платиной за счет растворения кремния в объеме пленки силицида полностью завершается при температуре 450 °C.

Сравнительный анализ РОР спектров от моносилцида платины, сформированного с использованием БТО и длительного одностадийного отжига при температуре 550 °C в течение 30 мин или двухстадийного при температуре 350 °C в течение 180 мин + 550 °C в течение 30 мин, свидетельствует о том, что они практически идентичны (рис. 2). Это означает, что твердофазный синтез PtSi с применением БТО протекает за гораздо меньшее время (на порядки величины меньше), чем при длительных равновесных термообработках.

Отличительной особенностью моносилцида платины, формируемого при БТО, является процентное содержание в нем атомов Pt. Если при длительных одностадийной и двухстадийной термообработках концентрация атомов платины составляет 48–49 %, а атомов кремния 51–52 %, то при БТО эти величины при температуре 450–550 °C соответственно равны 43–45 и 55–57 %. Концентрация атомов платины в слое моносилцида PtSi, формируемом при БТО, в 1,1 раза меньше, чем в силицидных слоях, полученных при стандартном длительном отжиге. Это связано, в первую очередь, с высокой подвижностью диффундирующих компонент в условиях БТО.

Заключение. Показана высокая эффективность процесса БТО системы Pt–Si для формирования термостабильных силицидов платины. В результате анализа РОР спектров установлено, что увеличение температуры нагрева при БТО подложки кремния с пленкой платины от 200 до 550 °C за 7 с в атмосфере N₂ приводит за счет диффузии Pt в Si при $T \leq 300$ °C и встречной совместной диффузии Si и Pt при $T > 300$ °C к последовательности фазовых переходов от Pt к двухфазной пленке Pt–Pt₂Si при $T \leq 250$ °C, однофазной Pt₂Si при $T = 300$ °C, двухфазной PtSi–Pt₂Si при 350 °C < T < 450 °C и однофазной равновесной структуры PtSi при $T = 450$ – 550 °C, что в 250–1800 раз быстрее, чем при длительных термообработках.

Список использованных источников

1. Мьюрарка, Ш. П. Силициды для СБИС / Ш. П. Мьюрарка; пер. с англ. В. В. Баранова; под ред. Ю. Д. Чистякова. – М., 1986. – 176 с.
2. Faber, E. J. On the kinetics of platinum silicide formation / E. J. Faber, R. A. M. Wolters, J. Schmitz // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98, N 8. – P. 082102 (1–3). <https://doi.org/10.1063/1.3556563>
3. Формирование барьеров Шоттки на основе никель-платинового силицидного сплава / В. А. Солодуха [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 1. – С. 9–16.
4. Низкотемпературный метод формирования контактного слоя силицида платины для силовых диодов Шоттки / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2013. – Т. 57, № 2. – С. 38–42.
5. Borisenko, V. E. Rapid Thermal Processing of Semiconductors / V. E. Borisenko, P. J. Hesketh. – New York; London, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1804-8>
6. Пилипенко, В. А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки / В. А. Пилипенко, В. Н. Пономарь, В. А. Горюшко // Инж.-физ. журн. – 2003. – Т. 76, № 4. – С. 95–98.
7. Эффект фотонной активации синтеза пленок силицидов в гетеросистеме (111) Si–Ni–Pt / В. М. Иевлев [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2007. – Т. 9, № 3. – С. 216–227.
8. Naem, A. A. Platinum silicide formation using rapid thermal processing / A. A. Naem // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 64, N 8. – P. 4161–4167. <https://doi.org/10.1063/1.341329>

References

1. Murarka Sh. P. *Silicides for VLSI Applications*. Academic Press, 1983. 200 p.
2. Faber E. J., Wolters R. A. M., Schmitz J. On the kinetics of platinum silicide formation. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 98, no. 8, pp. 082102 (1–3). <https://doi.org/10.1063/1.3556563>
3. Solodukha V. A., Turtsevich A. S., Solov'ev Y. A., Komarov F. F., Mil'chanin O. V., Kovaleva T. B., Gaponenko S. V. Formation of the nickel-platinum alloy silicide Schottky barriers. *Russian Microelectronics*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1134/s1063739713050077>
4. Komarov F. F., Milchanin O. V., Kovalyova T. B., Saladukha V. A., Solovjov J. A., Turtsevich A. S. Low Temperature Formation of the Platinum Silicide Contact Layer for the Schottky Diodes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2013, vol. 57, no. 2, pp. 38–42 (in Russian).
5. Borisenko V. E., Hesketh P. J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York, London, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1804-8>
6. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Gorushko V. A. Property Control of the Thin-Film Systems with Application of the Pulse Photon Treatment. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 4, pp. 95–98 (in Russian).
7. Ievlev V. M., Soldatenko S. A., Kushev S. B., Gorozhankin Yu. V., Vakhtel V. M. Effect of Photon Activation during the Synthesis of Silicide Films in the Heterosystem (111) Si–Ni–Pt. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 216–227 (in Russian).
8. Naem A. A. Platinum silicide formation using rapid thermal processing. *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 64, no. 8, pp. 4161–4167. <https://doi.org/10.1063/1.341329>

Информация об авторах

Пилипенко Владимир Александрович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Комаров Фадей Фадеевич – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovf@bsu.by.

Солодуха Виталий Александрович – канд. техн. наук, генеральный директор. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: VSaladukha@integral.by.

Горушко Валентина Алексеевна – ведущий инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Information about the authors

Pilipenka Uladzimir A. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.

Komarov Fadey F. – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovf@bsu.by.

Saladukha Vitali A. – Ph. D. (Engineering), General Manager. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: VSaladukha@integral.by.

Harushka Valiantsina A. – Leading engineer. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.