

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2025. Т. 28, № 1. С. 34—43.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202501.634

УДК 621.315; 538.958

**Быстрый термический отжиг в технологиях изготовления
диодных и фотодиодных структур на основе кремния**© 2025 г. А. С. Ким^{1,2,✉}, Н. А. Переведенцева³, С. Ю. Юрчук², Ф. Д. Коржов^{2,3}¹ ООО «ПРО ВЕКТОР»,

Локомотивный проезд, д. 21, Москва, 127238, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,

Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

³ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»,

ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: a.kim@provektor.ru

Аннотация. Исследовано влияние быстрого термического отжига в атмосфере H_2 на омические свойства контакта на примере двухслойной композиции Ti/Au к p^+-Si . Показано, что быстрый термический отжиг в атмосфере H_2 при температуре $340^\circ C$ в течение 20 с позволяет получить омический контакт с минимальным удельным сопротивлением. Это объясняется образованием силицидов титана на границе раздела Si/Ti . Также известно образование силицидов на границе раздела других переходных металлов, таких как Ni , Pd и Cr и кремния, что определяет применимость быстрого термического отжига для получения омических контактов на их основе. На примере ограничительного диода p^+-n подтверждена применимость процесса импульсной термообработки в технологиях изготовления кремниевых диодов для снижения последовательного сопротивления и как следствие повышения процента выхода годных.

Кроме того, исследовано влияние быстрого термического отжига в атмосфере H_2 на уровень обратного темнового тока на примере кремниевых многоплощадочного $p-i-n$ фоточувствительного элемента. Экспериментальные результаты показали улучшение темновых токов фоточувствительных площадок и охранного кольца фоточувствительного элемента после проведения быстрого термического отжига в атмосфере H_2 при температуре $450^\circ C$ в течение 5 с и как следствие повышение процента выхода годных фотодиодов. Это объясняется уменьшением плотности поверхностных состояний и стабилизацией зарядовых свойств на границе раздела $SiO_2/p-Si$ за счет насыщения оборванных Si -связей водородом. Подтверждена применимость быстрого термического отжига в атмосфере H_2 в технологиях изготовления фотодиодов на основе высокоомного $p-Si$ для снижения темновых токов.

Ключевые слова: быстрый термический отжиг, омический контакт, граница раздела Ti/Si , граница раздела $SiO_2/p-Si$, диод, фотодиод, фоточувствительный элемент

Для цитирования: Ким А.С., Переведенцева Н.А., Юрчук С.Ю., Коржов Ф.Д. Быстрый термический отжиг в технологиях изготовления диодных и фотодиодных структур на основе кремния. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2025; 28(1): 34—43. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202501.634>

© 2025 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Fast thermal annealing for manufacturing of silicon diodes and photodiodes

A. S. Kim^{1,2,*}, N. A. Perevedentseva³, S. Yu. Yurchuck², F. D. Korzhov^{2,3}

¹ LTD “PRO VEKTOR”,

21 Lokomotivnyi Ave., Moscow 127238, Russian Federation

² National University of Science and Technology “MISIS”,

4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

³ JSC “SPA “Orion”, 9 Kosinskaya Ave., Moscow 111538, Russian Federation

*Corresponding author: a.kim@provektor.ru

Abstract. The influence of rapid thermal annealing (RTA) in hydrogen atmosphere on ohmic properties of double-layer composition Ti/Au as contact on p^+ -Si was investigated. Based on experimental results it was confirmed that RTA at 340 °C for 20 s in hydrogen atmosphere allows to obtain an ohmic contact with the minimum of resistivity. This is due to titanium silicides formation on the Si/Ti interface. It also known silicides formation on Si-interface with other transition metals such as Ni, Pd and Cr, which determines the application of RTA for obtaining ohmic contacts based on them. The applicability of RTA for manufacture technology of silicon diodes to reduce the serial resistance, which leads to increased yield rate of diodes, was confirmed by applying on a limited diode p^+-n as an example. Also, the influence of RTA in hydrogen atmosphere on a dark current was investigated by applying on a silicon multi-element $p-i-n$ photosensitive element (PE) as an example. Based on experimental results it was confirmed that RTA at 450 °C for 5 s improved dark current of the photosensitive areas and the guard ring and as a result increased yield rate of photodiodes. This is due to decreasing of the density of surface states and stabilization of charge properties of the SiO_2/p -Si interface through saturation of dangling Si-bonds with hydrogen. This confirmed the applicability of RTA in hydrogen atmosphere for manufacture technology of photodiodes on high-resistance p -Si to reduce its dark current.

Keywords: rapid thermal annealing, RTA, ohmic contact, Ti/Si interface, SiO_2/p -Si interface, diode, photodiode

For citation: Kim A.S., Perevedentseva N.A., Yurchuck S.Yu., Korzhov F.D. Fast thermal annealing for manufacturing of silicon diodes and photodiodes. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2025; 28(1): 34–43. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202501.634>

Введение

Низкое удельное контактное сопротивление ρ_s является ключевым требованием при разработке омических контактов вместе с их устойчивостью и стабильностью к внешним эксплуатационным воздействиям. Однако на границе раздела кремний — металл повышение сопротивления неизбежно. Это может быть связано как с качеством подготовки поверхности кремния перед формированием металлизации, так и со структурой сформированного слоя металлизации и зарядовых свойств на границе раздела Si/Me. Кроме того, на поверхности кремния всегда имеется собственный оксид, непосредственно влияющий на свойства контакта вследствие механических напряжений. Также образование сложных металлических фаз,

зачастую имеющих сопротивление выше, чем сопротивление входящих в состав металлизации исходных компонентов, повышает общее сопротивление контакта.

Силициды переходных металлов, таких как $\text{Me} = \text{Ti}, \text{Ni}, \text{Pd}$ и Cr , обладают низким сопротивлением и термической совместимостью с кремнием [1, 2], что делает их перспективными для формирования омического контакта. Предполагается, что быстрый термический отжиг (БТО) в атмосфере H_2 способен качественно улучшить контактные свойства к кремнию p^+ -типа проводимости за счет образования силицидов на границе раздела Si/Me. Более того, это способствует очищению границы раздела с кремнием на атомном уровне [3], что также уменьшает вклад в удельное контактное сопротивление.

Уровень обратного темнового тока является одним из важных параметров фотодиодных структур. Вклад поверхностной составляющей в темновой ток фотодиодов на основе высокоомного p -Si по большей части связан с поверхностными состояниями на границе раздела оксида кремния SiO_2 , применяемого в качестве изолирующей пленки, и самого полупроводника. Как известно, термически выращенные пленки оксида кремния содержат положительный встроенный заряд [4, 5]. Частичная компенсация этого положительного встроенного заряда стабилизирует зарядовые свойства на границе раздела SiO_2/p -Si. Это может достигаться за счет насыщения оборванных Si-связей водородом [6], что приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на границе раздела SiO_2/p -Si. Предполагается, что БТО в атмосфере H_2 способен снизить уровень обратного темнового тока кремниевых фотодиодов с диэлектрической пленкой диоксида кремния за счет меньшего вклада поверхностной составляющей за счет стабилизации зарядовых свойств на границе раздела SiO_2/p -Si.

Ниже представлены результаты исследования влияния БТО в атмосфере H_2 на свойства омического контакта на примере двухслойной композиции Ti/Au к p^+ -Si, а также этого процесса на уровень обратного темнового тока фотодиода на основе p -Si с диэлектрической пленкой SiO_2 . Кроме того, проведена оценка применимости БТО в атмосфере H_2 в технологиях изготовления кремниевых диодных и фотодиодных структур.

LTLM–метод измерения удельного контактного сопротивления

Для получения омических контактов необходимо измерение малых значений удельного сопротивления. Известен ряд методов и модификаций измерения удельного контактного сопротивления полупроводниковых структур. TLM–метод (или *Transmission Line Method*) является одним из наиболее распространенных методов измерения удельного контактного сопротивления, учитывающим токи растекания под контактом в объеме полупроводника за счет его применимости на тонких полупроводниковых пленках и диффузионных слоях. В общем виде суть метода заключается в определении ρ_s посредством зондовых измерений полного сопротивления R_T между планарно расположенными контактными площадками. Величина R_T складывается из сопротивления контакта R_C и сопротивления объема полупроводника R_S [7]. В зависимости от геометрии контактных площадок данный метод имеет две модификации CTLM (*Circular Transmission Line Method*) и LTLM (*Linear Transmission Line Method*).

Измерение удельного контактного сопротивления CTLM–методом подробно описано в работах [8–11]. Так, в работе [10] этот метод использован для изучения омичности МДП–контактов $\text{Ti}/n^+ \text{ZnO}/n\text{-Ge}$ и $\text{Ti}/\text{ITO}/n\text{-Ge}$. В работе [11] исследованы контактные структуры Cr/Au, Cr/Au/Ag/Au, Ti/Pt/Au, Pt/Ti/Pt/Au, Pt/Au, Ti/Au, Ti/Pt/Ag и Ti/Pt/Ag/Au к p -GaSb для изготовления фотоэлектрических преобразователей, работающих при высоких плотностях фототока до 15 А/см^2 . Описание LTLM–метода представлено в работах [12, 13]. Так, в работе [12] определены механизмы протекания тока в омическом контакте Pd/Ni к p -GaN, а также оптимальное соотношение толщин слоев металлизации с минимальным значением удельного контактного сопротивления. А в работе [13] исследованы контактные свойства многослойной металлизации Ti (0,02 мкм)/Au (0,06 мкм)/Pd (0,04 мкм)/Au (0,05 мкм) к n -GaN.

В данной работе применяли LTLM–метод с линейной геометрией контактов к полупроводнику. Исследование LTLM–методом проводили на тест–структурах, состоящих из ряда одинаковых прямоугольных контактных площадок с длиной A и шириной Z , расположенных на различных расстояниях друг от друга: L_{12} , L_{13} , L_{23} и т. д. [14]. Для минимизации вклада краевого растекания тока необходимо выполнение условия $Z \ll A$.

Для определения удельного контактного сопротивления необходимо измерить сопротивление между контактными площадками зондовым методом и построить зависимость от расстояния между ними (рис. 1), угол наклона которой равен R_S/A , а L_T — длина переноса.

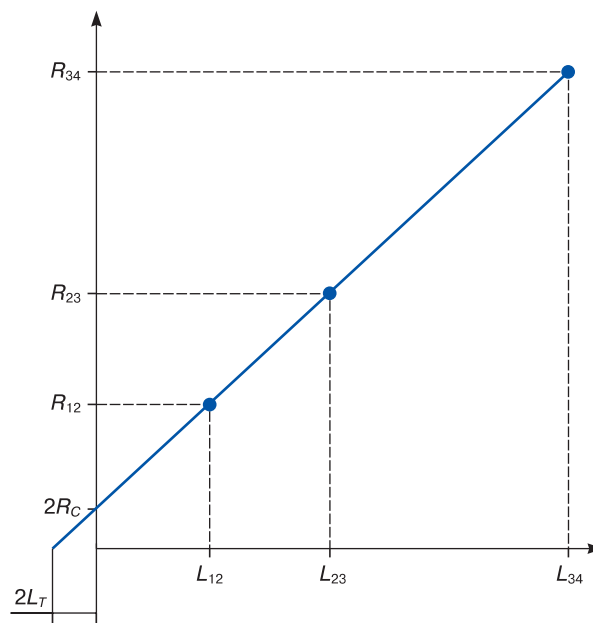


Рис. 1. Определение удельного контактного сопротивления LTLM–методом

Fig. 1. Determination of specific contact resistance by the LTLM method

Линейная аппроксимация зависимости измеренного сопротивления от расстояния между контактными площадками позволяет определить значение удельного контактного сопротивления по следующим формулам:

$$R_T = 2R_C + R_S \left(\frac{L}{Z} \right); \quad (1)$$

$$\tilde{n}_C = \frac{R_C^2 Z^2}{R_S}, \quad (2)$$

где R_C — сопротивление контакта; R_S — сопротивление объема полупроводника; L — расстояние между контактными площадками; Z — ширина контактной площадки.

Тест-структуры и методика эксперимента

Исследование проводили на кремниевых пластинах n -типа проводимости диаметром 60 мм. Предварительно пластины подвергали химической обработке в аммиачно-перекисном растворе и легированию бором методом ионной имплантации с энергией ускоренных ионов 100 кэВ и дозой облучения $6,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для получения высоколегированной приповерхностной области p^+ -типа проводимости.

Контакты для LTLM-метода создавали путем вакуумного напыления двухслойной композиции золота с адгезионным подслоем титана и последующим выделением фотолитографическим способом одинаковых прямоугольных площадок, расположенных на разных расстояниях друг от друга от 10 до 550 мкм (табл. 1). Размеры контактных площадок соответствуют $100 \times 1000 \text{ мкм}^2$.

Толщина слоя Au составляет 0,5 мкм, а адгезионного подслоя Ti — 0,02 мкм. Толщину металлизации измеряли на контактном профилометре Bruker Dektak 3030.

Далее тест-структуры подвергали БТО в атмосфере H_2 . Температура термообработки должна быть значительно ниже температуры плавления металлов, входящих в состав контакта:

$t_{\text{пл Au}} = 1337^\circ\text{C}$ и $t_{\text{пл Ti}} = 1668^\circ\text{C}$ [14, 15]. Исходя из этого, были выбраны следующие температуры: 300, 320, 340 и 360°C . Длительность БТО различалась и составляла 10, 20 и 30 с. На тест-структурах, прошедших БТО при температуре 360°C в течение 10 с, наблюдались зачатки отслоения пленки Au от слоя Ti, что, вероятно, связано с разницей их тепловых коэффициентов линейного расширения α (**ТКЛР**) практически в 1,5 раза: α_{Au} лежит в диапазоне $(13,3\text{—}14,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, α_{Ti} находится в пределах $(7,23\text{—}8,82) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [15—17]. Тем не менее эти тест-структуры также исследовали.

Для процесса БТО использовали высокотемпературную вакуумную печь оплавления RSO-650-200 NPO. Установка имеет ИК-лампы мощностью 18 кВт в количестве 18 шт. и рассчитана на диапазон температур от 50 до 650°C , поддерживая высокую скорость нагрева (более 75°C/s).

Результаты и их обсуждение

Электрофизические параметры экспериментальных тест-структур определяли путем зондовых измерений с использованием измерителя 4277ALCZ (Hewlett Packard) в диапазоне напряжений от -50 до 50 В . Измерения на тест-структурах проводили два раза: непосредственно после формирования двухслойной металлизации Ti/Au и после проведения БТО. Сравнение типовых вольт-амперных характеристик (**ВАХ**) изготовленных тест-структур до и после БТО в атмосфере H_2 при различных температурах и длительности отжига приведено на рис. 2.

Из полученных данных (см. рис. 2) следует, что непосредственно после формирования двухслойной металлизации ВАХ контакта всех тест-структур нелинейна даже при малых напряжениях. При этом БТО при температурах 300 и 320°C не привел к значительным улучшениям контактных свойств тест-структур. Линейность и симметричность ВАХ достигается после проведения БТО при температуре 340°C длительностью от 10 с. Дальнейшее повышение температуры процесса термо-

Таблица 1 / Table 1

Расстояние между контактными площадками тест-структур
Distance between contact pads of test structures

№	Контактные площадки	Расстояние, мкм	№	Контактные площадки	Расстояние, мкм	№	Контактные площадки	Расстояние, мкм
1	L_{12}	10	6	L_{23}	20	11	L_{35}	170
2	L_{13}	130	7	L_{24}	150	12	L_{36}	320
3	L_{14}	230	8	L_{25}	290	13	L_{45}	40
4	L_{15}	400	9	L_{26}	440	14	L_{46}	190
5	L_{16}	550	10	L_{34}	30	15	L_{56}	50

обработки до 360 °С обеспечивает линейность и симметричность ВАХ, несмотря на обнаруженное отслоение пленки Au от адгезионного подслоя Ti. Типичный вид ВАХ до и после проведения БТО в различных режимах представлен на рис. 2. Оптимальной температурой БТО в атмосфере H_2 , достаточной для формирования омического контакта Ti/Au к кремнию p^+ -типа проводимости, была выбрана температура 340 °С.

Для определения длительности БТО в атмосфере H_2 при температуре 340 °С, позволяющей получить омический контакт с минимальным удельным контактным сопротивлением, применяли LTLM-метод. По результатам измерений тест-структур этим методом и расчета в соответствии с формулами (1) и (2) определены следующие средние удельные контактные сопротивления:

– БТО в течение 10 с: $9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$;

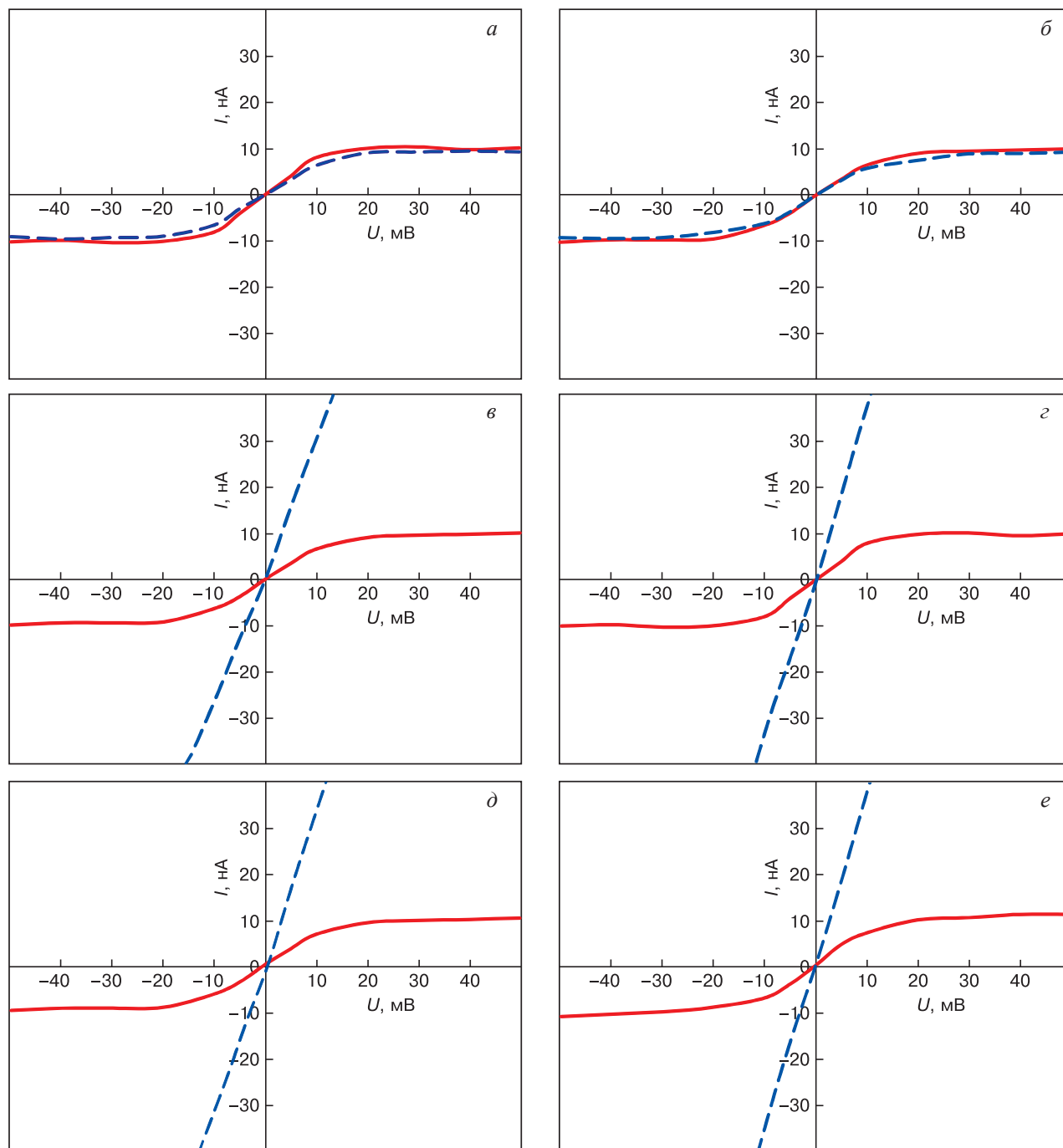


Рис. 2. Типовые ВАХ тест-структур до и после БТО в атмосфере H_2 : а, б, д — 300, 320 и 340 °С в течение 30 с; в, е — 340 и 360 °С в течение 10 с; г — 340 °С в течение 20 с.

Сплошная линия — после формирования металлизации; пунктирная — после проведения БТО

Fig. 2. Typical I-V characteristics of test structures before and after rapid thermal annealing (RTA) in an H_2 atmosphere: (а, б, д) 300, 320 and 340 °С for 30 s; (в, е) 340 and 360 °С for 10 s; (г) 340 °С for 20 s. Solid line is after metallization formation, dotted line is after RTA

- БТО в течение 20 с: $7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$;
- БТО в течение 30 с: $7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Можно сделать вывод, что БТО в атмосфере H_2 эффективен для получения омического контакта двухслойной композиции Ti/Au к кремнию p^+ -типа проводимости. Механизм наблюдаемого явления следующий. Импульсный термический отжиг инициирует образование силицидов титана на границе раздела Si/Ti , тем самым уменьшая удельное контактное сопротивление. При этом вместо Ti возможно использование других переходных металлов, таких как Ni , Pd и Cr , поскольку им также свойственно образование силицидов при взаимодействии с кремнием [1, 2].

Ограничительные диоды $p^+—n$. Рассмотрим влияние БТО на последовательное сопротивление диода. Последовательное сопротивление $p—n$ -перехода определяется из сопротивлений областей n - и p -типа проводимости, а также контактов к ним [18]. Как правило, уменьшение сопротивления областей n - и p -типа проводимости достигается посредством подбора оптимальных толщин областей и уровнями концентрации примесей в них. При этом сопротивления контактов к областям n - и p -типа проводимости зависят от материалов, используемых в составе металлизации, и метода их формирования. Известно использование алюминия в качестве омического контакта в технологиях изготовления кремниевых приборов. Формирование такого контакта включает напыление алюминия толщиной порядка 1 мкм, выделение контактных площадок фотолитографическим методом и вжигание контакта в температурном диапазоне 470—550 °C [19]. Недостатком использования алюминия в качестве омического контакта является его несоответствие ряду требований по надежности при воздействии специальных внешних факторов.

Для приборов повышенной надежности предпочтительно применение многослойных контактных структур. В качестве адгезионного подслоя могут быть использованы хром, титан, молибден, никель. Однако зачастую применяется титан благодаря хорошей адгезии к кремнию и SiO_2 , способности, как и алюминий, восстанавливать SiO_2 и отсутствию образования интерметаллических соединений [20]. Проводящий слой, наносимый поверх адгезионного, должен иметь низкое удельное сопротивление и обеспечивать качественное подсоединение внешних выводов с помощью золотых проволочек. Всем этим условиям соответствует золото.

Для определения влияния БТО на последовательное сопротивление диода и оценки применимости этого процесса в технологиях изготовления кремниевых диодов были произведены четыре экспериментальные партии ограничительных ди-

одов $p^+—n$ с малой площадью контакта к области p^+ -типа проводимости, составляющей 0,002 мм².

Исходным материалом этой структуры являются пластины эпитаксиального кремния n/n^+ марки 50КЭФ150/380КЭС0,01 диаметром 60 мм с ориентацией (100). Топология изготавливаемого ограничительного диода также включает стоп-область n^+ -типа проводимости. Срез структуры представлен в патенте [21].

Первая и вторая партии ограничительных диодов были изготовлены по стандартному маршруту, состоящему из следующих основных технологических этапов:

- термическое окисление для создания пассивирующей пленки;
- загонка фосфора в лицевую сторону пластины методом ионной имплантации и последующая термическая разгонка легирующей примеси для формирования стоп-области n^+ -типа проводимости;
- загонка фосфора в обратную сторону пластины методом ионной имплантации и последующая термическая разгонка легирующей примеси для создания тыльного контактного слоя n^+ -типа проводимости;
- загонка бора в лицевую сторону пластины для формирования области p^+ -типа проводимости;
- формирование двухслойных металлических контактов Ti/Au к эмиттеру диода и тыльному контактному слою n^+ -типа проводимости методом вакуумного напыления с последующим выделением фотолитографическим способом.

Третья и четвертая партии ограничительных диодов дополнительно включали БТО в атмосфере водорода H_2 при температуре 340 °C в течение 20 с, поскольку при большей длительности процесса удельное контактное сопротивление, как было показано выше, практически не меняется.

Для измерения прямой ветки ВАХ изготовленных ограничительных диодов использовали описанный выше зондовый метод. Диапазон измеряемых напряжений — от 0 до 1,2 В. На рис. 3 представлены для сравнения 2 вида типовых прямых ветвей ВАХ ограничительных диодов, изготовленных по маршруту без БТО и с ним.

В табл. 2 приведены типовые значения последовательного сопротивления и проценты выхода годных диодов, изготовленных по стандартной технологии, а также диодов, изготовленных по измененному маршруту.

Как видно из полученных результатов (см. табл. 2), применение БТО в атмосфере водорода H_2 при температуре 340 °C в течение 20 с для формирования омического контакта Ti/Au к кремнию p^+ -типа проводимости позволило снизить диапазон типовых значений последовательного сопротивления r_n . При этом нижняя граница уменьши-

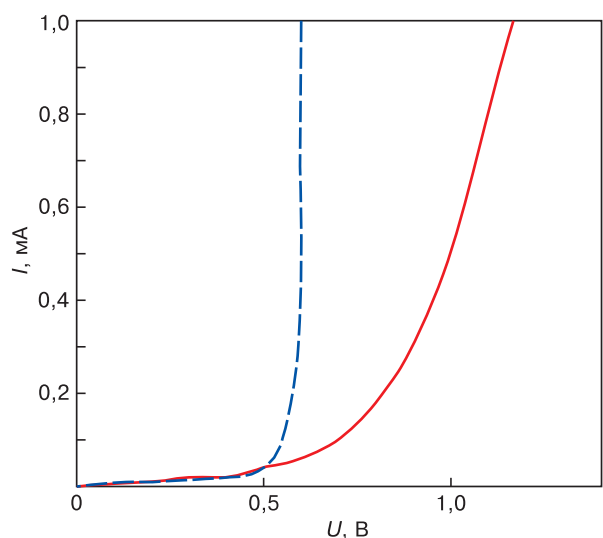


Рис. 3. Типовые прямые ветви ВАХ ограничительного диода p^+-n .
Сплошная линия — ограничительный диод без БТО; пунктирная — с БТО

Fig. 3. Typical forward branches of the current-voltage characteristic of a p^+-n clamping diode. Solid line is clamping diode without rapid thermal annealing (RTA); dashed is with RTA

Таблица 2 / Table 2

Типовые значения последовательного сопротивления ограничительных диодов p^+-n
Typical values of series resistance of p^+-n clamp diodes

Параметр	Диоды	
	Стандартная технология	БТО
Последовательное сопротивление, кОм	1,2—1,3	0,6—0,7
Выход годных, %	75	90

лась в 2 раза, а верхняя — в 1,86 раз в сравнении с аналогичным параметром диодов, изготовленных по стандартной технологии. Одновременно с этим интервал значений для диодов с БТО полностью соответствует требованию, предъявляемому к рассматриваемому ограничительному диоду — $r_n \leq 0,8$ кОм. Таким образом, было достигнуто повышение выхода годных на 15 %. Этим и подтверждается применимость БТО в технологии изготовления диодов на кремнии p^+ -типа проводимости для уменьшения их последовательного сопротивления.

На основе полученных результатов получен патент РФ [22].

Многоплощадочные $p-i-n$ фотодиоды. Для определения влияния БТО на уровень темнового тока кремниевых фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с изолирующей пленкой SiO_2 и оценки применимости данного процесса в технологиях их изготовления были произведены две экспериментальные партии многоплощадочных $p-i-n$ фотодиодов. В качестве исходного материала ис-

пользовали пластины монокристаллического кремния p -типа проводимости диаметром 60 мм с ориентацией (111). Удельное сопротивление пластин составляло 5 кОм·см. Топология изготавливаемых ФЧЭ включает расположенные в 4 квадрантах фоточувствительные площадки (ФЧП) и охран- ный элемент в виде планарного n^+-p -перехода. При этом 4 внешние и 4 внутренние площадки вписаны в концентрические окружности диаме- тром 4 и 2 мм соответственно. Площадь внешних и внутренних ФЧП составляет 18 и 0,6 мм², а ширина зазора между ними — 200 мкм [23]. Для пассива- ции периферии ФЧЭ, изоляции ФЧП и в качестве просветляющего покрытия применяли термиче- ский SiO_2 . Срез структуры представлен в патен- те [24].

Первая партия ФЧЭ была изготовлена по стан- дартному маршруту, состоящему из следующих основных технологических этапов:

- термическое окисление для создания пассивирующей пленки;
- загонка и разгонка фосфора для создания областей ФЧП и охранного кольца;
- загонка фосфора в обратную сторону пла- стины для формирования геттерирующего слоя;
- удаление геттера;
- диффузионная загонка бора для создания тыльного контактного слоя p^+ -типа проводимости;
- вскрытие контактных окон в просветляющей пленке SiO_2 до полупроводника.

Вторая партия ФЧЭ дополнительно включала БТО в атмосфере водорода H_2 . Температура БТО, с одной стороны, должна быть ниже температуры плавления металлов, входящих в состав контакта, с другой – достаточной для эффективного образо- вания кремний-водородных связей. Температура плавления хрома $t_{\text{пл Cr}} = 1877$ °C [15], температура плавления золота $t_{\text{пл Au}}$ была определена ранее. С учетом этого, выбраны следующие режимы.

Температура БТО, °C	Время выдержки, с
340	20
400	20
450	5
470	5
500	5

Измерение уровня темновых токов ФЧП и ох- ранного кольца изготовленных ФЧЭ проводили на многозондовой измерительной системе РМ-5 Karl Suss при рабочем напряжении 200 В.

На ФЧЭ, прошедших БТО при температуре 340 и 400 °C, вне зависимости от длительности про- цесса не наблюдалось значительных изменений темновых токов как ФЧП, так и охранного кольца. При температуре импульсной термообработки в диапазоне 450—500 °C уровень темновых токов

Таблица 3 / Table 3

Типовые значения темновых токов ФЧЭ
Typical values of dark currents of photosensitive elements

Параметр	ФЧЭ	
	Стандартная технология	БТО
I_T (внешние ФЧП), нА	60—90	40—75
I_T (внутренние ФЧП), нА	8—10	5—8
I_T (охранное кольцо), нА	700—1000	250—800
Выход годных, %	30	45

снижался. При этом наиболее эффективное снижение уровня темновых токов ФЧП и охранного кольца ФЧЭ достигалось после БТО при температуре 450 °С в течение 5 с.

В табл. 3 приведены типовые значения темновых токов ФЧП и охранного кольца при рабочем напряжении ФЧЭ, изготовленных по стандартной технологии, и ФЧЭ, прошедших дополнительный БТО при температуре 450 °С в течение 5 с, а также выход годных ФЧЭ.

Как видно из представленных в табл. 3 данных, применение БТО в атмосфере водорода H_2 при температуре 450 °С в течение 5 с позволило уменьшить диапазон типовых значений темновых токов. При этом нижняя граница темновых токов по внешним ФЧП снизилась в 1,5 раза, по внутренним ФЧП — в 1,6 раза в сравнении с аналогичными параметрами ФЧЭ, изготовленных по стандартной технологии. Таким образом, было достигнуто повышение выхода годных на 15 %, что подтверждает применимость БТО в технологиях изготовления фотодиодов на основе высокоомного p -Si с изолирующей пленкой SiO_2 . Можно предположить, что снижение темновых токов происходит за счет насыщения оборванных Si-связей водородом, что приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний и стабилизации зарядовых свойств на границе раздела SiO_2/p -Si.

Заключение

Исследовано влияние БТО в атмосфере H_2 на омические свойства контакта на примере двухслойной композиции Ti/Au к p^+ -Si. Изготовлены тест-структуры на кремнии n -типа проводимости с высоколегированной приповерхностной областью p^+ -типа проводимости. На тест-структурах созданы одинаковые прямоугольные контактные площадки, расположенные на расстояниях друг

от друга от 10 до 550 мкм, для применения LT-LM-метода с линейной геометрией контактов к полупроводнику.

Измерение электрофизических параметров тест-структур в широком диапазоне напряжений (от –50 до 50 В) непосредственно после формирования металлизации и проведения БТО в диапазоне температур 300—360 °С с шагом 20 °С позволило определить температуру, при которой достигается линейность и симметричность ВАХ контакта. Для оценки длительности процесса импульсной термообработки, обеспечивающей минимальное удельное контактное сопротивление, LTLM-методом были рассчитаны удельные контактные сопротивления для тест-структур, прошедших БТО при установленной температуре длительностью 10, 20 и 30 с.

Установлено, что БТО в атмосфере H_2 при температуре 340 °С в течение 20 с позволяет получить минимальное удельное контактное сопротивление Ti/Au к p^+ -Si — $7 \cdot 10^{-3}$ Ом·см². Это обусловлено образованием силицидов титана на границе раздела Si/Ti, обладающих низким сопротивлением, благодаря чему и улучшаются контактные свойства. При этом вместо Ti возможно использование других переходных металлов, таких как Ni, Pd и Cr, поскольку им также свойственно образование силицидов при взаимодействии с кремнием.

На примере ограничительного $p^+ - n$ -диода изучено влияние БТО на последовательное сопротивление диода. Показано, что импульсная термообработка в атмосфере H_2 при температуре 340 °С в течение 20 с улучшила исследуемый параметр и, как следствие, повысила выход годных диодов на 15 %. Таким образом, подтверждена применимость БТО для уменьшения последовательного сопротивления в технологии изготовления диодов на кремнии.

Также исследовано влияние БТО на уровень обратного темнового тока на примере многоплощадочного $p-i-n$ -ФЧЭ на основе высокоомного p -Si с изолирующей пленкой SiO_2 . Показано, что импульсная термообработка в атмосфере H_2 при температуре 450 °С в течение 5 с улучшила темновые токи как ФЧП, так и охранного кольца ФЧЭ и, как следствие, повысила выход годных фотодиодов на 15 %. Таким образом, подтверждена применимость БТО в атмосфере H_2 в технологиях изготовления фотодиодов на основе высокоомного p -Si для снижения темновых токов за счет насыщения оборванных Si-связей водородом, что приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний и стабилизации зарядовых свойств на границе раздела SiO_2/p -Si.

Библиографический список

1. Chen L.J. (ed.). Silicide technology for integrated circuits. London: Institution of Electrical Engineers; 2004. 279 p.
2. Gambino J.P., Colgan E.G. Silicides and ohmic contacts. *Materials Chemistry and Physics*. 1998; 52(2): 99—146. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(98\)80014-X](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(98)80014-X)
3. Вавилов К., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. *Дефекты в кремнии и на его поверхности*. М.: Наука; 1990. 216 с.
4. Hiraki A. Low temperature reactions at Si/metal interfaces; What is going on at the interfaces? *Surface Science Reports*. 1983; 3(7): 357—412. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(84\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0167-5729(84)90003-7)
5. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь; 1987. 464 с.
6. Гриценко В.А. Структура границ раздела кремний/оксид и нитрид/оксид. *Успехи физических наук*. 2009; 179(9): 921—930. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200909a.0921>
7. Бурлаков Р.Б. К вопросу об определении удельного контактного сопротивления TLM-методом с прямоугольными контактами к полупроводникам. *Вестник Омского университета*. 2018; 23(4): 78—86. [https://doi.org/10.25513/1812-3996.2018.23\(4\).78-86](https://doi.org/10.25513/1812-3996.2018.23(4).78-86)
8. Aldosari H.M., Cooley K.A., Yu Sh.-Y., Simchi H., Mohny S.E. Very low-resistance Mo-based ohmic contacts to GeTe. *Journal of Applied Physics*. 2017; 122(17): 175302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4990407>
9. Holland A.S., Pan Y., Alnassar M.S.N., Luong St. Circular test structures for determining the specific contact resistance of ohmic contacts. *Facta Universitatis-series: Electronics and Energetics*. 2017; 30(3): 313—326. <https://doi.org/10.2298/FUEE1703313H>
10. Gupta S., Paramahans M.P., Mishra K.R., Nainani A., Abraham M. C., Lodha S. Contact resistivity reduction through interfacial layer doping in metal-interfacial layer-semiconductor contacts. *Journal of Applied Physics*. 2013; 113(23): 234505. <https://doi.org/10.1063/1.4811340>
11. Солдатенков Ф.Ю., Сорокина С.В., Тимошина Н.Х., Хвостиков В.П., Задиранов Ю.М., Растегаева М.Г., Усикова А.А. Снижение омических потерь и повышение мощности фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида индия. *Физика и техника полупроводников*. 2011; 45(9): 1266—1273.
12. Jang H.W., Kim K.H., Kim J.K., Hwang S.-W., Yang J.J., Lee K.J., Son S.-J., Lee J.-L. Low-resistance and thermally stable ohmic contact on p-type GaN using Pd/Ni metallization. *Applied Physics Letters*. 2001; 79(12): 1822—1824. <https://doi.org/10.1063/1.1403660>
13. Lu C., Chen H., Lv X., Xie X., Mohammad S.N. Temperature and doping-dependent resistivity of Ti/Au/Pd/Au multilayer ohmic contact on GaN. *Journal of Applied Physics*. 2002; 91(11): 9218—9224. <https://doi.org/10.1063/1.1471390>
14. Андреев А.Н., Растегаева М.Г., Растегаев В.П., Решанов С.А. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов. *Физика и техника полупроводников*. 1998; 32(7): 832—838.
15. Свойства элементов. Справочник. Под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия; 1985. 672 с.
16. Березин Б.Я., Кац С.А., Кенисарин М.М., Чеховской В.Я. Теплота и температура плавления титана. *Теплофизика высоких температур*. 1974; 12(3): 524—529.
17. Бестугин А.Р., Филонов О.М., Киришина И.А., Андреева Е.В. Особенности проектирования технологического процесса изготовления инерционного элемента микромеханического датчика на поверхностных акустических волнах. В сб.: *III Междунар. науч.-техн. конф. «Радиотехника, электроника и связь (РЭИС-2015)»*. Омск, 06–08 октября 2015. М.: ООО Издательский дом «Наука»; 2015. С. 438—443.
18. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига; 2011. 446 с.
19. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высш. школа; 1986. 368 с.
20. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь; 1989. 400 с.
21. Патент (РФ) № 2015630066. Либерова Г.В., Маркова Т.Л., Рыбаков А.В. Кристалл кремниевого ограничительного диода. Заявл.: 16.04.2015; опубл.: 20.07.2015.
22. Патент (РФ) № 2790272, МПК H01L 21/28, H01L 31/18. Ким А.С., Серко Н.А. Способ формирования омических контактов к кремнию на основе двухслойной системы металлизации Ti/Au. Заявл.: 03.08.2022; опубл.: 15.02.2023. https://yandex.ru/patents/doc/RU2790272C1_20230215
23. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2012. 640 с.
24. Описание полезной модели к патенту (РФ) № 205303 U1, МПК H01L 31/028. Ким А.С., Колкий А.Н. Многослойный кремниевый p-i-n-фотодиод с двухслойной диэлектрической пленкой. Заявл.: 10.03.2021; опубл.: 08.07.2021.

References

1. Chen L.J. (ed.). Silicide technology for integrated circuits. London: Institution of Electrical Engineers; 2004. 279 p.
2. Gambino J.P., Colgan E.G. Silicides and ohmic contacts. *Materials Chemistry and Physics*. 1998; 52(2): 99—146. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(98\)80014-X](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(98)80014-X)
3. Vavilov K., Kiselev V.F., Mukashev B.N. Defects in silicon and on its surface. Moscow: Nauka; 1990. 216 p. (In Russ.)
4. Hiraki A. Low temperature reactions at Si/metal interfaces; What is going on at the interfaces? *Surface Science Reports*. 1983; 3(7): 357—412. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(84\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0167-5729(84)90003-7)
5. Chernyaev V.N. Technology of production of integrated circuits and microprocessors. Moscow: Radio i svyaz'; 1987. 464 p. (In Russ.)
6. Gritsenko V.A. Structures of silicon/oxide and nitride/oxide interfaces. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*; 2009; 179(9): 921—930. (In Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200909a.0921>
7. Burlakov R.B. On determination of contact resistivity by tlm method with rectangular contacts to semi-

conductors. *Vestnik Omskogo universiteta = Herald of Omsk University*. 2018; 23(4): 78—86. (In Russ.). <https://doi.org/10.25513/1812-3996>

8. Aldosari H.M., Cooley K.A., Yu Sh.-Y., Simchi H., Mohney S.E. Very low-resistance Mo-based ohmic contacts to GeTe. *Journal of Applied Physics*. 2017; 122(17): 175302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4990407>

9. Holland A.S., Pan Y., Alnassar M.S.N., Luong St. Circular test structures for determining the specific contact resistance of ohmic contacts. *Facta Universitatis-series: Electronics and Energetics*. 2017; 30(3): 313—326. <https://doi.org/10.2298/FUEE1703313H>

10. Gupta S., Paramahans M.P., Mishra K.R., Nainani A., Abraham M. C., Lodha S. Contact resistivity reduction through interfacial layer doping in metal–interfacial layer–semiconductor contacts. *Journal of Applied Physics*. 2013; 113(23): 234505. <https://doi.org/10.1063/1.4811340>

11. Soldatenkov F.Y., Sorokina S.V., Timoshina N.K., Khvostikov V.P., Zadiranov Y.M., Rastegaeva M.G., Usikova A.A. A decrease in ohmic losses and an increase in power in GaSb photovoltaic converters. *Semiconductors*. 2011; 45(9): 1219—1226.

12. Jang H.W., Kim K.H., Kim J.K., Hwang S.-W., Yang J.J., Lee K.J., Son S.-J., Lee J.-L. Low-resistance and thermally stable ohmic contact on p-type GaN using Pd/Ni metallization. *Applied Physics Letters*. 2001; 79(12): 1822—1824. <https://doi.org/10.1063/1.1403660>

13. Lu C., Chen H., Lv X., Xie X., Mohammad S.N. Temperature and doping-dependent resistivity of Ti/Au/Pd/Au multilayer ohmic contact on–GaN. *Journal of Applied Physics*. 2002; 91(11): 9218—9224. <https://doi.org/10.1063/1.1471390>

14. Andreev A.N., Rastegaeva M.G., Rastegaev V.P., Reshanov S.A. On calculation of current spreading in the semiconductor under specific contact resistance measurements. *Semiconductors*. 1998; 32(7): 832—838. (In Russ.)

15. Dric M.E. (ed.). Properties of elements. Moscow: Metallurgiya; 1985. 672 p.

16. Berezin B.Ya., Kac S.A., Kenisarin M.M., Chekhovskoj V.Ya. Heat and melting point of titanium. *Teplofizika vysokih temperature*. 1974; 12(3): 524—529. (In Russ.)

17. Bestugin A.R., Filonov O.M., Kirshina I.A., Andreeva E.V. Features of designing the technological process for manufacturing the inertial element of a micromechanical sensor on surface acoustic waves. In: III Inter. scient.–techn. conf. "Radio engineering, electronics and communication (REIS–2015)". Omsk, October 6–8, 2015. Moscow: OOO Izdatel'skii dom "Nauka"; 2015. P. 438—443. (In Russ.)

18. Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. Solid-state photoelectronics. Photodiodes. Moscow: Fizmatkniga; 2011. 446 p. (In Russ.)

19. Kurnosov A.I., Yudin V.V. Technology of production of semiconductor devices and integrated circuits. Moscow: Vyssh. Shkola; 1986. 368 p. (In Russ.)

20. Koledov L.A. Technology and design of microcircuits, microprocessors and microassemblies. Moscow: Radio i svyaz; 1989. 400 p. (In Russ.)

21. Patent (RU) No 2015630066 C1, Liberova G.V., Markova T.L., Rybakov A.V. Crystal of silicon limiting diode. Appl.: 16.04.2015; publ.: 20.07.2015. (In Russ.)

22. Patent (RU) No 2790272 C1, MPC H01L 21/28, H01L 31/18. Kim A.S., Serko N.A. Method for forming ohmic contacts to silicon by means of a bilayer Ti/Au metallisation system. Appl.: 03.08.2022; publ.: 15.02.2023. (In Russ.)

23. Baranochnikov M.L. Receivers and radiation detectors. Directory. Moscow: DMK Press; 2012. 640 p. (In Russ.)

24. Description of the utility model for patent (RU) No. 205303 U1, IPC H01L 31/028. Kim A.S., Kolkiy A.N. Multi-site silicon p–i–n photodiode with a two-layer dielectric film. Appl.: 10.03.2021; publ.: 08.07.2021. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ким Александра Сергеевна — ведущий инженер–технолог, ООО «ПРО ВЕКТОР», Локомотивный проезд, д. 21, Москва, 127238, Российская Федерация; аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6299-6498>; e-mail: a.kim@provektor.ru

Переведенцева Наталья Александровна — инженер–технолог 2 категории, ГНЦ АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация

Юрчук Сергей Юрьевич — канд. физ.–мат. наук, доцент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6435-3823>; e-mail: yurchuk60@mail.ru

Коржов Федор Дмитриевич — измеритель приборов 3 разряда, ГНЦ АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация; студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

Aleksandra S. Kim — Lead Engineer–Technologist, LTD “PRO VECTOR”, 21 Lokomotivnyi Ave., Moscow 127238, Russian Federation; Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6299-6498>; e-mail: a.kim@provektor.ru

Natalya A. Perevedentseva — 2nd Category Engineer–Technologist, JSC “SPA “Orion”, 9 Kosinskaya Ave., Moscow 111538, Russian Federation

Sergey Yu. Yurchuck — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor of the Department of Semiconductor Electronics and Semiconductor Physics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6435-3823>; e-mail: yurchuk60@mail.ru

Fedor D. Korzhov — 3rd Category Instrument Operator, JSC “SPA “Orion”, 9 Kosinskaya Ave., Moscow 111538, Russian Federation; Student, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

Поступила в редакцию 28.01.2025; поступила после доработки 20.02.2025; принята к публикации 28.03.2025
Received 28 January 2025; Revised 20 February 2025; Accepted 28 March 2025