

тактной сети / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Никифоров М. А. № 2011100389/28; заявл. 11.01.11; опубл. 27.08.12. Бюл. № 24.

БРЮХОВА Анна Сергеевна, аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: annaivan29@gmail.com

Для цитирования

Кузнецов А. А., Брюхова А. С. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 160–164. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-160-164.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г.

© А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: KuznetsovAA@omgups.ru

УДК 621.382

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-164-168

А. И. БЛЕСМАН¹
Р. Б. БУРЛАКОВ²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Омский государственный
университет им. Ф. М. Достоевского,
г. Омск

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТА, ОСНОВАННОГО НА ДВУХ КОНТАКТАХ Al-p-Si И Ti-p-Si С БАРЬЕРОМ ШОТКИ

Задачей исследований является разработка структуры и способа изготовления фотоэлемента, способного принимать излучение либо в ближней инфракрасной области спектра (1–1,4) мкм, либо в области (0,5–1,4) мкм. Рассмотрены способ изготовления и результаты исследования фотоэлектрических характеристик двухспектрального фотоэлемента, основанного на двух контактах с барьером Шоттки Al-p-Si и Ti-p-Si, расположенных на противоположных сторонах Si пластины. Показано, что удаление нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины ведет к значительному увеличению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания контакта Al-p-Si, расположенного на этой поверхности и освещаемого через кремниевую пластину.

Ключевые слова: способ изготовления фотоэлемента, кремний *p*-типа, контакты с барьером Шоттки.

Введение. Развитие систем, использующих оптические методы передачи информации, предусматривает использование различного рода фотоприемников. В таких системах обычно используются фоторезисторы и фотодиоды [1]. При этом электронно-оптические системы используют один оптический канал, который обеспечивает регистрацию оптического излучения одной длины волны или интегрального потока излучения в некотором спектральном диапазоне, что создает ряд трудностей при приеме оптического излучения в условиях оптических помех в области рабочих длин волн.

Изложенные в этой работе исследования направлены на разработку способа изготовления фотоэлемента, способного обеспечить прием излучения рабочей длины волны в ближней инфракрасной области спектра при наличии по-

мех видимого диапазона длин волн при сохранении способности фотоэлемента принимать излучение как в видимой, так и в ближней инфракрасной областях спектра. Решение этой задачи заключается в применении двухспектрального фотоэлемента, представляющего собой оптоэлектронный прибор, работающий одновременно в двух спектральных диапазонах. В этом двухспектральном фотоэлементе, который освещается с одной стороны, используются один омический контакт и два контакта с барьером Шоттки, расположенные на противоположных сторонах Si пластины *p*-типа: контакт Al-*p*-Si, действующий на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов из металлической пленки в полупроводник в ближней инфракрасной области спектра при освещении через кремниевую подложку, и контакт Ti-*p*-Si, освещаемый со стороны полупрозрачного слоя Ti.

Следует отметить, что контакты металл — полупроводник с барьером Шоттки широко применяются как в структурах выпрямительных диодов с высоким быстродействием, так и в фотодиодах Шоттки [1]. Выполнено большое количество работ, посвященных созданию фотоприемников инфракрасного диапазона длин волн [2, 3], использующих (в частности) барьерные контакты Pt-*p*-Si, Au-*p*-Si, Cr-*p*-Si, Cu-*p*-Si [4–6]. Электрические свойства контактов Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки также исследованы в большом количестве работ, например, в [7–11]. Однако информация о фотодиодах с барьерным контактом Al-Si ограничена сведениями об их применении в структурах солнечных элементов [12], а сведения о фотодиодах с барьерным контактом Ti-Si практически отсутствуют. В связи с этим представленные в настоящей работе экспериментальные результаты исследования двухспектрального фотоэлемента, основанного на использовании двух контактов с барьером Шоттки: Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si, представляют определенный интерес.

Экспериментальные методики и результаты.

В данной работе для изготовления экспериментальных образцов использовалась полированная с одной стороны пластина кремния *p*-типа (марка: 100-2Вк-2кдб10-(111)4-460, номинальное значение удельного сопротивления — 10 Ом·см, толщина пластины — 460 мкм), которая была разрезана на образцы с размерами 8×12 мм². Один из прямоугольных уголков (с длиной катета 1 мм) каждого образца был срезан для визуальной фиксации его полированной стороны. Затем после обезжиривания в спирте и ацетоне два образца наклеивались пиццином полированными плоскостями на стеклянную подложку (20×24 мм²), а половина неполированной стороны (размером 8×6 мм²) без среза угла каждого образца маскировалась участком бумажного фильтра, предварительно пропитанного пиццином. После этого выполнялось химическое травление при комнатной температуре немаскированных участков поверхности (со срезанным углом) двух образцов, наклеенных на стеклянную подложку, в травильной смеси: HNO₃:HF = 3:1 во фторопластовом тигле (диаметром 10 см) при интенсивном перемешивании травителя в течение 70 секунд с последующей заливкой дистиллированной водой и промывкой в ней 6–8 раз. После отделения образцов от стеклянной подложки они обезжиривались путем однократного кипячения в четыреххлористом углероде и трехкратного кипячения в бензине и ацетоне.

Непосредственно перед вакуумным осаждением металла (алюминия) омических контактов образцы кремния промывались в этиловом спирте и ацетоне, очищались (от SiO₂) в растворе HF + H₂O (1:1) в течение 70–80 секунд с последующей промывкой в дистиллированной воде и ацетоне, а затем образцы помещались в свободную металлическую маску с прямоугольными отверстиями, которую устанавливали в вакуумную камеру установки УВН 2М1. Вакуумную камеру откачивали до давления остаточных газов (1,5–2)·10⁻⁵ мм рт. ст., отжигали образцы в вакууме в течение 10–15 минут при температуре 120 °С и после этого при этой температуре выполняли локальное осаждение тонкой пленки алюминия толщиной 460 нм в виде полос с размерами 4×8 мм² (перпендикулярных продольным осям образцов) путем испарения алюминия из *W* испарителя (четыре *W* проволоки длиной 65 мм и диаметром 0,8 мм, соединенные параллельно на концевых участках испарителя и расположенные в его центре

на расстоянии 1 мм друг от друга) через отверстия в маске на неполированные (локально протравленные и непротравленные участки) поверхности двух образцов кремния. Затем полученные два образца кремния с осажденными контактами Al-*p*-Si дополнительно отжигали в вакуумной камере (давление — (9–10)·10⁻³ мм рт. ст.) при температуре 540 °С в течение 20 минут в кварцевой трубчатой печи сопротивления, что обеспечивало образование омического контакта к кремнию *p*-типа в центральной области каждого образца. При этом происходило слабое окисление поверхности образца кремния и пленки алюминия.

После охлаждения образцов до 300 °С их перекладывали в свободную металлическую маску с прямоугольными отверстиями с размерами 2×6 мм² и расстоянием 4 мм между их продольными осями, которую устанавливали в вакуумную камеру и при давлении остаточных газов (1,5–2)·10⁻⁵ мм рт. ст. и температуре образцов 100 °С выполняли локальное осаждение через три отверстия в маске тонкой пленки алюминия толщиной 350 нм в виде трех полос с размерами 2×6 мм² (перпендикулярных продольным осям образцов), из которых центральная полоса алюминия осаждалась на поверхность металла омического контакта, а две другие полосы — на протравленный и непротравленный участки каждого образца. При этом алюминий испаряли из вышеописанного *W* испарителя. Эта операция обеспечивала образование двух контактов Al-*p*-Si с барьером Шоттки к кремнию *p*-типа на одной стороне с омическим контактом в концевых (протравленном и непротравленном) областях каждого образца.

Контакты Ti-*p*-Si были созданы путем вакуумного испарения малой навески титана (5,5 мг) из вновь изготовленного вольфрамового испарителя (четыре *W* проволоки длиной 65 мм и диаметром 0,8 мм, соединенные параллельно на всей длине испарителя), который предварительно отжигался в глубоком вакууме при 1200–1400 °С. Перед вакуумным осаждением титана на полированные плоскости образцов их перекладывали в свободную металлическую маску с прямоугольными отверстиями с размерами 2×6 мм² и расстоянием 4 мм между их продольными осями, которую устанавливали в вакуумную камеру и при давлении остаточных газов (1,5–2)·10⁻⁵ мм рт. ст. и температуре образцов 70 °С выполняли локальное осаждение (через два отверстия в маске) тонкой пленки титана толщиной 6,6 нм в виде двух полос с размерами 2×6 мм² (перпендикулярных продольным осям образцов). При этом происходило образование двух контактов Ti-*p*-Si с барьером Шоттки к кремнию *p*-типа на полированной стороне (противоположной стороне с омическим контактом) в центральной области каждого образца.

Таким образом, в результате реализации вышеописанного технологического процесса на каждом образце кремния были созданы два фотоэлемента, каждый из которых имеет общий омический контакт Al-Si и два контакта с барьером Шоттки: Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si, расположенные на противоположных сторонах Si пластины (рис. 1) и освещаемые с одной стороны: контакт Al-*p*-Si освещается через кремниевую подложку, а контакт Ti-*p*-Si — через полупрозрачный слой Ti (направление потока излучения на рис. 1 не показано). При этом один из этих двух фотоэлементов имеет контакт Al-*p*-Si на протравленном участке поверхности образца,

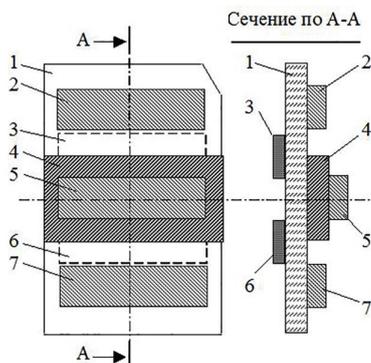


Рис. 1. Вид на экспериментальный образец с неполированной стороны пластины кремния и его сечение по А-А:
 1 — пластина кремния *p*-типа;
 2 — контакт Al-*p*-Si с барьером Шоттки на протравленном участке неполированной стороны;
 3 и 6 — контакты Ti-*p*-Si с барьером Шоттки на полированной стороне;
 4 — омический контакт Al-*p*-Si;
 5 — участок пленки Al на омическом контакте;
 7 — контакт Al-*p*-Si с барьером Шоттки на непротравленном участке неполированной стороны пластины

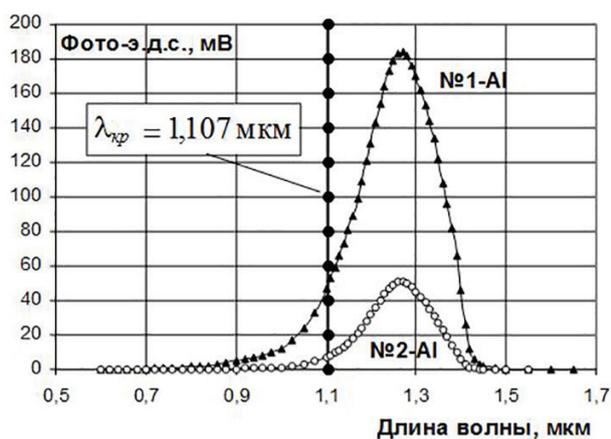


Рис. 2. Спектры фото-э.д.с. диодов № 1-Al и № 2-Al с барьером Шоттки, изготовленных на протравленном и непротравленном участках неполированной стороны Si пластины и освещаемых через Si пластину

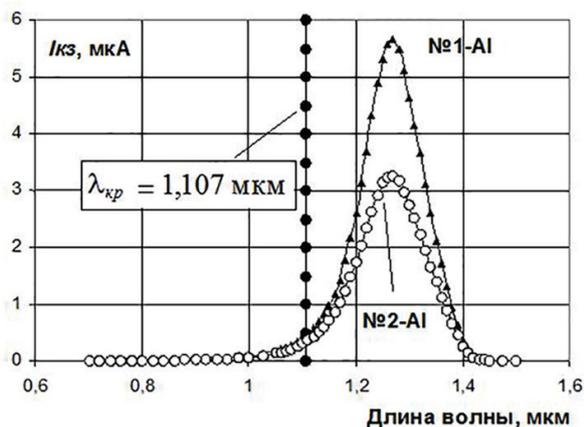


Рис. 3. Спектры тока короткого замыкания диодов № 1-Al и № 2-Al с барьером Шоттки, изготовленных на протравленном и непротравленном участках неполированной стороны Si пластины и освещаемых через Si пластину

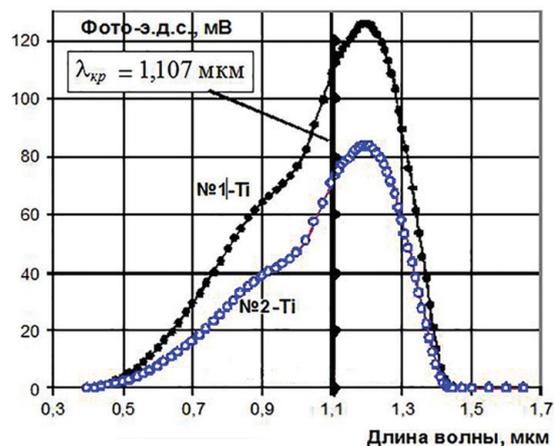


Рис. 4. Спектры фото-э.д.с. диодов № 1-Ti и № 2-Ti с барьером Шоттки, изготовленных на полированной стороне Si пластины и освещаемых со стороны полупрозрачного слоя Ti

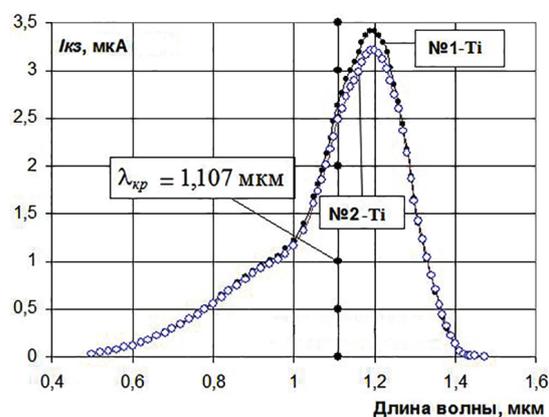


Рис. 5. Спектры тока короткого замыкания диодов № 1-Ti и № 2-Ti с барьером Шоттки, изготовленных на полированной стороне Si пластины и освещаемых со стороны полупрозрачного слоя Ti

а другой — на непротравленном участке этого образца.

В данной работе были измерены следующие фотоэлектрические характеристики контактов Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки: спектр фото-э.д.с. в фотовольтаическом режиме (режим холостого хода фотоэлемента) и спектр тока короткого замыкания в фотовольтаическом режиме, и определена высота барьера Шоттки этих контактов фотоэлектрическим методом на основе использования их спектров тока короткого замыкания. Эти характеристики были измерены на четырех фотоэлементах (изготовленных на двух пластинах кремния *p*-типа) с помощью модифицированного спектрофотометра VSU 2-P, в котором в качестве источника излучения была применена галогеновая лампа накаливания (МАЯК Н1, 12 В, 55 Вт) со стабилизированным источником питания ТЕС 5818. При этом исследуемый фотоэлемент устанавливали в поток излучения в кюветной камере спектрофотометра, а спектр фото-э.д.с. и спектр тока короткого замыкания измеряли с помощью мультиметров М890С и МУ-60, соответственно. При измерениях этих спектров напряжение на галогеновой лампе поддерживали на неизменном уровне 9,02 В.

Измеренные фотоэлектрические характеристики двух контактов Al-*p*-Si, изготовленных на одной

Высота барьера Шоттки исследованных контактов металл-*p*-Si, измеренная фотоэлектрическим методом

Направление излучения	1-я пластина <i>p</i> -Si		2-я пластина <i>p</i> -Si	
	№ контакта	Высота барьера, В	№ контакта	Высота барьера, В
через Si пластину	1-1-Al	0,863	2-1-Al	0,863
	1-2-Al	0,86	2-2-Al	0,86
со стороны слоя Ti	1-1-Ti	0,862	2-1-Ti	0,863
	1-2-Ti	0,861	2-2-Ti	0,863

стороне пластины на ее протравленном (№ 1-Al) и непротравленном (№ 2-Al) участках и освещаемых через Si пластину, и двух контактов Ti-*p*-Si, изготовленных на обратной полированной стороне этой пластины (контакты № 1-Ti и № 2-Ti) и освещаемых со стороны полупрозрачного слоя Ti, представлены на рис. 2–5. На контактах с барьером Шоттки, изготовленных на второй кремниевой пластине (в одном технологическом процессе с контактами первой пластины) были получены аналогичные данные. Результаты измерений фотоэлектрическим методом высоты барьера Шоттки для всех исследованных восьми контактов металл-*p*-кремний на четырех фотоэлементах представлены в табл. 1.

Из представленных на рис. 2 и 3 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлементов при использовании контактов Al-*p*-Si (№ 1-Al и № 2 Al, освещаемых через Si пластину) следует, что в этом случае они действуют в диапазоне длин волн (1–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм, т.е. в ближней инфракрасной области спектра, при этом фотоэлемент на основе контакта №1-Al (расположенного на протравленном участке неполированной стороны Si пластины) обладает на длине волны максимума более высокими значениями фото-э.д.с. (рис. 2) и тока короткого замыкания (рис. 3) по сравнению с фотоэлементом на основе контакта № 2 Al, расположенного на непротравленном участке неполированной стороны этой пластины. Ограничение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания этих фотоэлементов в видимой области спектра (длина волны меньше 0,8 мкм) обусловлено тем, что излучение видимой области спектра сильно поглощается при распространении через Si пластину, а фотоэлементы в этом случае действуют на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов, которые возбуждаются в Al пленке излучением с длинами волн выше длинноволновой границы кремния ($\lambda_{кр} = 1,107$ мкм) и переходят в *p*-кремний, когда их энергия превышает высоту барьера ϕ_{bp} контакта Al-*p*-Si. Сильное уменьшение фото-э.д.с. и тока короткого замыкания в фотоэлементе на основе контакта № 2 Al, расположенного на непротравленном участке неполированной стороны Si пластины, по-видимому, связано с повышенной рекомбинацией носителей тока в нарушенном слое кремния, примыкающем к контакту с Al.

Из представленных на рис. 4 и 5 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлементов, использующих контакты Ti-*p*-Si (№ 1-Ti и № 2 Ti, освещаемых со стороны полупрозрачного

слоя Ti, следует, что в этом случае они действуют в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,2 мкм, т.е. в более широкой области спектра, которая включает в себя как большой участок спектра видимого излучения (0,5–0,8) мкм, так и ближнюю инфракрасную область спектра. При этом фотоэлемент на основе контакта № 1-Ti (расположенного на стороне, которая противоположна протравленному участку неполированной стороны Si пластины) обладает на длине волны максимума более высокими значениями фото-э.д.с. (рис. 4), а также повышенными значениями тока короткого замыкания (рис. 5) по сравнению с фотоэлементом на основе контакта № 2 Ti, расположенного напротив непротравленного участка неполированной стороны этой пластины.

Расширение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания этих фотоэлементов в видимую область спектра обусловлено тем, что при освещении фотоэлементов со стороны полупрозрачного слоя Ti (коэффициент пропускания которого равен 0,46) излучение видимой и инфракрасной областей спектра распространяется с частичным поглощением как в слое Ti, так и в Si пластине. В этом случае фотоэлементы действуют как на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов из пленки Ti в *p*-кремний, так и на основе возбуждения электронно-дырочных пар в *p*-кремнии. При этом слабо поглощаемое излучение с длинами волн выше длинноволновой границы кремния ($\lambda_{кр} = 1,107$ мкм) достигает противоположной поверхности, отражается от нее и возвращается к контакту Ti-*p*-Si. Уменьшение фото-э.д.с. и тока короткого замыкания в фотоэлементе на основе контакта № 2 Ti, расположенного напротив непротравленного участка неполированной стороны Si пластины, по-видимому, связано с повышенным поглощением излучения в нарушенном слое кремния, примыкающем к контакту с Al.

Следует отметить, что при необходимости использования только одного фотоэлемента из выше рассмотренных двух фотоэлементов на пластине кремния его можно изготовить путем разделения образца, показанного на рис. 1, методом скрайбирования на два образца с размерами 8×6 мм².

Заключение. Таким образом, в настоящей работе предложена структура и методика изготовления двухспектрального фотоэлемента, основанного на двух контактах с барьером Шоттки Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si, расположенных на противоположных сторонах Si пластины и освещаемых с одной стороны: контакт Al-*p*-Si освещается через кремниевую

пластину, а контакт Ti-*p*-Si — через полупрозрачный слой Ti. Измерены спектры фото-э.д.с. и тока короткого замыкания двух фотоэлементов, расположенных на кремниевой пластине. Показано, что при использовании контактов Al-*p*-Si, освещаемых через Si пластину, они действуют в диапазоне длин волн (1–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм, при этом фотоэлемент на основе контакта Al-*p*-Si, расположенного на протравленном участке неполированной стороны Si пластины обладает на длине волны максимума более высокими значениями фото-э.д.с. и тока короткого замыкания по сравнению с фотоэлементом на основе контакта Al-*p*-Si, расположенного на непротравленном участке неполированной стороны этой пластины. Фотоэлементы, использующие контакты Ti-*p*-Si на полированной стороне этой пластины и освещаемые со стороны полупрозрачного слоя Ti, действуют в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,2 мкм.

Предложенные структура и методика изготовления двухспектрального фотоэлемента обеспечивают время его изготовления в интервале (3,5–4) часа, что позволяет применять их в учебном процессе при выполнении студентами лабораторных, курсовых и дипломных работ, связанных с изготовлением ими экспериментальных образцов фотоэлементов, содержащих контакты с барьером Шоттки.

Библиографический список

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: моногр. В 2-х кн. / пер. с англ. М.: Мир, 1984. Кн. 2. 456 с.
2. Rogalski A. Infrared detectors: status and trends. Review // Progress in Quantum Electronics. 2003. Vol. 27, no. 2. P. 59–210. DOI: 10.1016/S0079-6727(02)00024-1.
3. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: пер. с англ. / под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с. ISBN 5-02-032029-3.
4. Dalal V. L. Analysis of photoemissive Schottky barrier photodetectors // Journal of Applied Physics. 1971. Vol. 42, no. 6. P. 2280–2284. DOI: 10.1063/1.1660537.
5. Chen C. K., Nechay B., Tsaur B.-Y. Ultraviolet, visible, and infrared response of PtSi Schottky-barrier detectors operated in the front-illuminated mode // IEEE Transactions on Electron Devices. 1991. Vol. 38, no. 5. P. 1094–1103. DOI: 10.1109/16.78384.
6. Casalino M., Moretti L., Giofrè L. [et al.]. Back-illuminated silicon resonant cavity-enhanced photodetector at 1550 nm // Physica E. 2009. Vol. 41, no. 6. P. 1097–1101. DOI: 10.1016/j.physe.2008.08.049.

7. Şenarslan E., Betül Güzeldir B., Sağlam M. Investigation of the electrical characteristics of Al/*p*-Si/Al Schottky diode // Journal of Physics: Conference Series 7. 2016. Vol. 707, no. 1. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/707/1/012013.

8. Tataroglylu A., Altındal Ş. Analysis of interface states and series resistance of MIS Schottky diodes using the current-voltage (*I*–*V*) characteristics. // Microelectronic Engineering. 2008. Vol. 85, no. 1. P. 233–237. DOI: 10.1016/j.mee.2007.05.043.

9. Cowley A. M. Titanium-Silicon Schottky barrier diodes // Solid-State Electronics. 1970. Vol. 12, no. 4. P. 403–414. DOI: 10.1016/0038-1101(70)90151-6.

10. Sahin B., Çetin H., Ayyıldız E. The effect of series resistance on capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes // Solid State Communications. 2005. Vol. 135, no. 8. P. 490–495. DOI: 10.1016/j.ssc.2005.05.050.

11. Çetin H., Şahin B., Ayyıldız E. [et al.]. Ti/*p*-Si Schottky barrier diodes with interfacial layer prepared by thermal oxidation // Physica B. 2005. Vol. 364, no. 1-4. P. 133–141. DOI: 10.1016/j.physb.2005.04.001.

12. Godfrey R. B., Green M. A. 655 mV open-circuit voltage, 17.6 % efficient silicon MIS solar cells // Applied Physics Letters. 1979. Vol. 34, no. 11. P. 790–793. DOI: 10.1063/1.90646.

БЛЕСМАН Александр Иосифович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Физика», директор научно-образовательного ресурсного центра «Нанотехнологии» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 6809-3460

AuthorID (РИНЦ): 144661

ORCID: 0000-0003-2837-3469

AuthorID (SCOPUS): 11539204200

ResearcherID: B-3079-2014

Адрес для переписки: physics@omgtu.ru

БУРЛАКОВ Рудирий Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Прикладная и медицинская физика» Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского.

AuthorID (РИНЦ): 37654

Адрес для переписки: burlakovrb@e-mail.omsu.ru

Для цитирования

Блесман А. И., Бурлаков Р. Б. Способ изготовления фотоэлемента, основанного на двух контактах Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 164–168. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-164-168.

Статья поступила в редакцию 28.09.2018 г.

© А. И. Блесман, Р. Б. Бурлаков