

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

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

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДНЫХ КОНТАКТОВ PtSi-*n*-Si И PdSi-*n*-Si С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

Задачей исследований является разработка структуры и способа изготовления фотоэлемента, способного принимать излучение либо в ближней инфракрасной области спектра (0,9–1,4) мкм, либо в области (0,5–1,4) мкм. Рассмотрены способ изготовления и результаты исследования фотоэлектрических характеристик двухспектрального фотоэлемента, основанного на двух силицидных контактах с барьером Шоттки PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), расположенных на противоположных сторонах кремниевой пластины. Показано, что исследованный фотоэлемент может быть использован для преобразования энергии излучения в электрическую энергию при комнатной температуре в двух диапазонах: либо в ближней инфракрасной области спектра (0,9–1,4) мкм, либо в области (0,5–1,4) мкм. Это свойство разработанного фотоэлемента позволит расширить область его применения. Фотоэлемент обладает простой структурой и технологией с временем его изготовления в интервале (2,5–3) часа.

Ключевые слова: способ изготовления фотоэлемента, кремний *n*-типа, контакты с барьером Шоттки PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si).

Введение. Изложенные в этой работе исследования направлены на разработку структуры и способа изготовления фотоэлемента, способного обеспечить прием излучения рабочей длины волны в ближней инфракрасной области спектра при наличии помех 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 AgAl-*n*-Si и два контакта с барьером Шоттки, расположенные на противоположных сторонах кремниевой пластины *n*-типа: контакт PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), действующий на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов из силицидного слоя PtSi (или PdSi) в кремний в ближней инфракрасной области спектра при освещении через кремниевую пластину, и контакт PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), освещаемый со стороны полупрозрачного слоя PtSi (или PdSi).

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], использующих (в частности) барьерные контакты Pt-*p*-Si, Au-*p*-Si, Cr-*p*-Si, Cu-*p*-Si [3, 4]. Фотоэлектрические свойства контактов PtSi-*n*-Si и PdSi-*n*-Si с барьером Шоттки также исследованы в большом количестве работ, например, в [5–9]. Однако информация о двухспектральных фотодиодах с барьерными контактами PtSi-*n*-Si и PdSi-*n*-Si является ограниченной. В связи с этим представленные в настоящей работе экспериментальные результаты исследования двухспектрального фотоэлемента, основанного на использовании двух контактов с барьером Шоттки PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), расположенных на противоположных сторонах кремниевой пластины *n*-типа, представляют определенный интерес.

Экспериментальные методики и результаты. В данной работе для изготовления экспериментальных образцов использовалась пластина кремния *n*-типа с полированной и текстуриро-

ванной поверхностями на ее противоположных сторонах (марка: 100-1A2-КЭФ4,5-(100)-460, номинальное значение удельного сопротивления — 4,5 Ом·см, толщина пластины — 460 мкм), которая была разделена методом скрайбирования на пластины кремния с размерами 8×12 мм². Один из прямоугольных уголков (с длиной катета 1 мм) каждой пластины кремния был срезан для визуальной фиксации ее полированной стороны.

Непосредственно перед вакуумным осаждением металла контакта (Pt, или Pd) с барьером Шоттки две пластины 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 пластины кремния помещались в свободную металлическую маску с отверстиями диаметром 4 мм, 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 14–15 минут при температуре 200 °С и после этого при этой температуре выполняли локальное осаждение через отверстия в маске тонкой пленки Pt с толщиной 6 нм (или Pd с толщиной 7,8 нм) в виде диска диаметром 4 мм путем испарения малой навески Pt с массой 24 мг (или Pd с массой 22 мг) из (предварительно подвергнутого отжигу в глубоком вакууме при 1200–1400 °С) W испарителя (четыре W проволоки длиной 65 мм и диаметром 0,8 мм, соединенные параллельно на всей длине испарителя), на половине (не имеющей срезанных углов) текстурированной поверхности каждой кремниевой пластины. Эта операция обеспечивала образование силицидного контакта PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si) с барьером Шоттки к кремнию *n*-типа на текстурированной поверхности кремниевой пластины [10, 11].

Затем переключивали кремниевые пластины в свободной металлической маске с их поворотом относительно продольных осей пластин на 180° и поворотом продольных осей пластин на 180°, которую устанавливали в вакуумную камеру и при давлении остаточных газов (1,5–2)·10⁻⁵ мм рт. ст. отжигали образцы в вакууме в течение 14–15 минут при температуре 200 °С. После этого при температуре кремниевых пластин 200 °С выполняли локальное осаждение через отверстия в маске тонкой пленки Pt с толщиной 3,8 нм (или Pd с толщиной 5,3 нм) в виде диска диаметром 4 мм путем испарения малой навески Pt с массой 15 мг (или Pd с массой 15 мг) из вышеописанного W испарителя на половине (со срезанным углом) полированной поверхности каждой кремниевой пластины. При этом происходило образование силицидного контакта PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si) с барьером Шоттки к кремнию *n*-типа на полированной поверхности кремниевой пластины [10, 11].

Перед вакуумным осаждением металла (алюминия) омических контактов переключивали кремниевые пластины в свободную металлическую маску с прямоугольными отверстиями с размерами 6·5 мм², 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

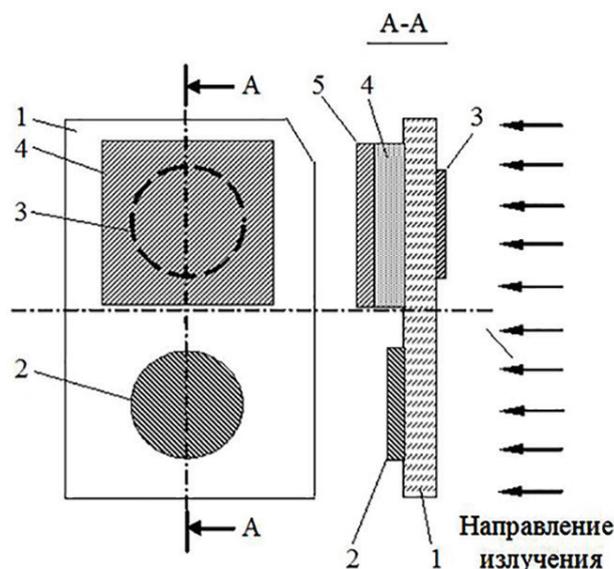


Рис. 1. Вид на экспериментальный образец со стороны текстурированной поверхности кремниевой пластины и его сечение по А-А:
1 — пластина кремния *n*-типа;
2 — контакт PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si) с барьером Шоттки на текстурированной стороне кремниевой пластины 1; 3 — контакт PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si) с барьером Шоттки на полированной стороне кремниевой пластины; 4 — омический контакт Al-*n*-Si на текстурированной стороне кремниевой пластины 1; 5 — пленка Ag на омическом контакте 4

в вакууме в течение 10–15 минут при температуре 120 °С и после этого при этой температуре выполняли локальное осаждение через прямоугольные отверстия в маске тонкой пленки алюминия толщиной 360 нм 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) на половине (со срезанным углом) текстурированной поверхности каждой кремниевой пластины. Затем при температуре 100 °С выполняли осаждение на Al пленку (в одном процессе откачки вакуумной камеры) слоя серебра (Ag) толщиной 240 нм путем испарения Ag из танталовой лодочки.

Таким образом, в результате реализации вышеописанного технологического процесса на каждой кремниевой пластине 1 был создан фотоэлемент, содержащий омический контакт AgAl-*n*-Si (4, 5) и два силицидных контакта 2 и 3 с барьером Шоттки PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), расположенные на противоположных сторонах кремниевой пластины 1 (рис. 1) и освещаемые с одной стороны: контакт PtSi-*n*-Si (2) на текстурированной поверхности кремниевой пластины 1 освещается через кремниевую пластину 1, а контакт PtSi-*n*-Si (3) на полированной поверхности кремниевой пластины 1 — через полупрозрачный слой PtSi.

Аналогично, контакт PdSi-*n*-Si (2) на текстурированной поверхности кремниевой пластины 1 освещается через кремниевую пластину 1, а контакт PdSi-*n*-Si (3) на полированной поверхности кремниевой пластины 1 — через полупро-

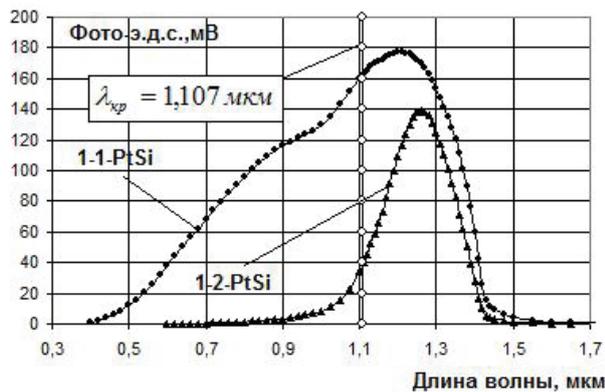


Рис. 2. Спектры фото-э.д.с. контакта 1-1-PtSi-*n*-Si, расположенного на полированной стороне Si пластины и освещаемого со стороны слоя PtSi, и контакта 1-2-PtSi-*n*-Si, расположенного на текстурированной стороне Si пластины и освещаемого через кремниевую пластину

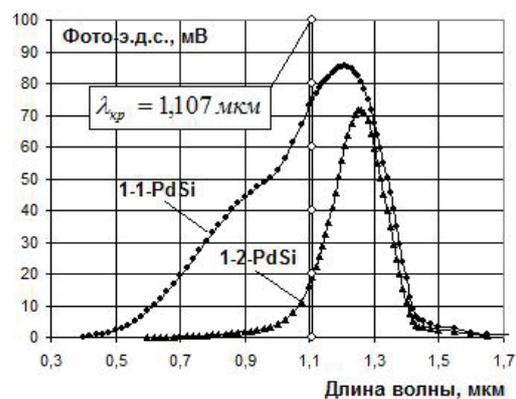


Рис. 4. Спектры фото-э.д.с. контакта 1-1-PdSi-*n*-Si, расположенного на полированной стороне Si пластины и освещаемого со стороны слоя PdSi, и контакта 1-2-PdSi-*n*-Si, расположенного на текстурированной стороне Si пластины и освещаемого через кремниевую пластину

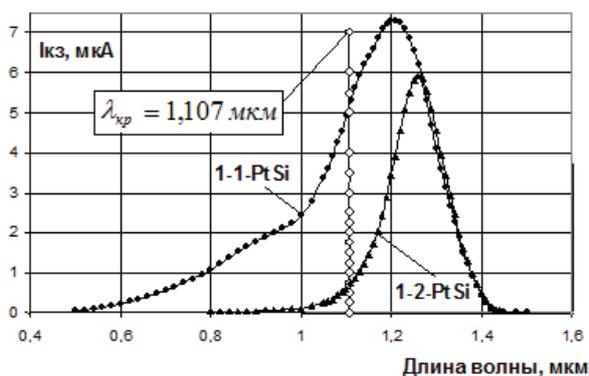


Рис. 3. Спектры тока короткого замыкания контакта 1-1-PtSi-*n*-Si, расположенного на полированной стороне Si пластины и освещаемого со стороны слоя PtSi, и контакта 1-2-PtSi-*n*-Si, расположенного на текстурированной стороне и освещаемого через кремниевую пластину

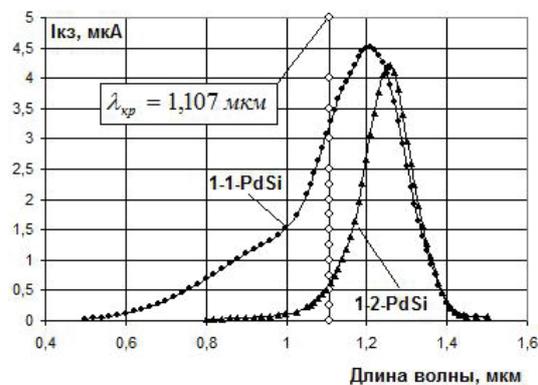


Рис. 5. Спектры тока короткого замыкания контакта 1-1-PdSi-*n*-Si, расположенного на полированной стороне Si пластины и освещаемого со стороны слоя PdSi, и контакта 1-2-PdSi-*n*-Si, расположенного на текстурированной стороне и освещаемого через кремниевую пластину

зрачный слой PdSi (на рис. 1 стрелками показано направление потока излучения).

В данной работе были измерены следующие фотоэлектрические характеристики контактов PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-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 при комнатной температуре на четырех фотоэлементах (изготовленных на четырех пластинах кремния *n*-типа) с помощью модифицированного спектрофотометра VSU 2-Р, 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 замыка-

ния измеряли с помощью мультиметров М890С и МУ-60 соответственно. При измерениях этих спектров напряжение на галогеновой лампе подерживали на неизменном уровне 9,02 В.

Измеренные фотоэлектрические характеристики двух контактов PtSi-*n*-Si, изготовленных на противоположных (полированной и текстурированной) сторонах кремниевой пластины и освещаемых с одной стороны пластины, представлены на рис. 2 и 3. На контактах PtSi-*n*-Si с барьером Шоттки, изготовленных на второй кремниевой пластине (в одном технологическом процессе с контактами первой пластины) были получены аналогичные данные.

Измеренные фотоэлектрические характеристики двух контактов PdSi-*n*-Si, изготовленных на противоположных (полированной и текстурированной) сторонах третьей кремниевой пластины и освещаемых с одной стороны этой пластины, представлены на рис. 4 и 5.

На контактах PdSi-*n*-Si с барьером Шоттки, изготовленных на четвертой кремниевой пластине (в одном технологическом процессе с контактами

Высота барьера Шоттки исследованных контактов силицид металла-*n*-Si, измеренная фотоэлектрическим методом

Направление излучения	PtSi- <i>n</i> -Si		PdSi- <i>n</i> -Si	
	№ контакта	Высота барьера, В	№ контакта	Высота барьера, В
через Si пластину	1-2-PtSi	0,857	1-2-PdSi	0,853
	2-2-PtSi	0,858	2-2-PdSi	0,853
со стороны слоя PtSi (или PdSi)	1-1-PtSi	0,857	1-1-PdSi	0,853
	2-1-PtSi	0,857	2-1-PdSi	0,854

третьей пластины) были получены аналогичные данные. Результаты измерений фотоэлектрическим методом высоты барьера Шоттки для всех исследованных восьми контактов металл-*n*-кремний на четырех фотоэлементах представлены в табл. 1.

Когда в фотоэлементе используется контакт PtSi-*n*-Si (2) с барьером Шоттки, расположенный на текстурированной поверхности пластины 1 и освещаемый через кремниевую пластину 1, то из представленных на рис. 2 и 3 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт 2, следует, что в этом случае он действует в диапазоне длин волн (0,9–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм, т.е. в ближней инфракрасной области спектра. В этом случае ограничение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента в видимой области спектра (длина волны меньше 0,8 мкм) обусловлено тем, что излучение видимой области спектра сильно поглощается при распространении через кремниевую пластину 1, а фотоэлемент действует на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов, которые возбуждаются в слое PtSi излучением с длиной волн выше длинноволновой границы кремния ($\lambda_{кр} = 1,107$ мкм) и переходят в кремний, когда их энергия превышает высоту барьера ϕ_{bn} контакта PtSi-*n*-Si.

Когда в фотоэлементе используется контакт PtSi-*n*-Si (3) с барьером Шоттки, расположенный на полированной поверхности пластины 1 и освещаемый со стороны полупрозрачного слоя PtSi, то из представленных на рис. 2 и 3 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт 3, следует, что в этом случае он действует 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. В этом случае расширение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента в видимую область спектра обусловлено тем, что при освещении фотоэлемента со стороны полупрозрачного слоя PtSi излучение видимой и ин-

фракрасной областей спектра распространяется с частичным поглощением как в слое PtSi, так и в кремниевой пластине 1. В этом случае фотоэлемент действует как на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов из слоя PtSi в кремний, так и на основе генерации электронно-дырочных пар в кремнии.

Из представленных на рис. 4 и 5 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт PdSi-*n*-Si (3), расположенный на полированной поверхности пластины 1 и освещаемый со стороны полупрозрачного слоя PdSi, следует, что в этом случае он действует 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, по сравнению с контактом PdSi-*n*-Si (2), расположенным на текстурированной поверхности пластины 1, освещаемым через кремниевую пластину 1 и действующим в диапазоне длин волн (0,9–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм, т.е. в ближней инфракрасной области спектра.

Расширение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт PdSi-*n*-Si (3), в видимую область спектра обусловлено тем, что при освещении фотоэлемента со стороны полупрозрачного слоя PdSi излучение видимой и инфракрасной областей спектра распространяется с частичным поглощением как в слое PdSi, так и в кремниевой пластине 1. В этом случае фотоэлемент действует как на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов из слоя PdSi в *n*-кремний, так и на основе генерации электронно-дырочных пар в *n*-кремнии.

Заключение. Таким образом, в настоящей работе предложена структура и методика изготовления двухспектрального фотоэлемента, основанного на двух контактах PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), с барьером Шоттки, расположенных на противоположных сторонах Si пластины и освещаемых с одной стороны: контакт PtSi-*n*-Si (или PdSi-*n*-Si), расположенный на текстурированной стороне пластины, освещается через кремниевую пла-

стину, а расположенный на ее противоположной полированной стороне второй контакт PtSi-n-Si (или PdSi-n-Si) — через полупрозрачный слой PtSi (или PdSi). Измерены при комнатной температуре спектры фото-э.д.с. и тока короткого замыкания двух контактов с барьером Шоттки, расположенных на противоположных сторонах кремниевой пластины. Показано, что при использовании контакта PtSi-n-Si (или PdSi-n-Si), освещаемого через Si пластину, фотоэлемент действует в диапазоне длин волн (0,9–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм. При использовании контакта PtSi-n-Si (или PdSi-n-Si), расположенного на полированной стороне Si пластины и освещаемого со стороны полупрозрачного слоя PtSi (или PdSi), фотоэлемент действует в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,2 мкм. Следовательно, исследованный фотоэлемент может быть использован для преобразования энергии излучения в электрическую энергию при комнатной температуре в двух спектральных диапазонах: либо в ближней инфракрасной области спектра, либо 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. Это свойство рассмотренного фотоэлемента позволит расширить его область применения. Кроме этого, он обладает простой конструкцией и технологией изготовления, которые обеспечивают время его изготовления в интервале (2,5–3) часа.

Библиографический список

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: моногр. В 2-х кн. / пер. с англ. М.: Мир, 1984. Кн. 2. 456 с.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: пер. с англ. / под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с. ISBN 5-02-032029-3.
3. 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.
4. Casalino M., Moretti L., Gioffri 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.
5. McCafferty P. G., Sellai A., Dawson P. [et al.]. Barrier characteristics of PtSi/p-Si Schottky diodes as determined from I-V-T measurements // *Solid-State Electronics*. 1996. Vol. 39, no. 4. P. 583–592. DOI: 10.1016/0038-1101(95)00162-X.
6. Li M. C., Zhao L. C., Zhen X. H. [et al.]. Effects of annealing processing on morphological, compositional and

Schottky characterization of PtSi/Si diodes // *Materials Letters*. 2003. Vol. 57, no. 24-25. P. 3735–3740. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00171-X.

7. Ding Y., Campbell S. A. Barrier tuning in thin PtSi/Si contacts // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89, no. 9. 093508. DOI: 10.1063/1.2344847.

8. Sellai A., Dawson P. Effect of temperature and inhomogeneity on the yield of PtSi-n-Si photodetectors // *Journal of Crystal Growth*. 2006. Vol. 288, no. 1. P. 166–170. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.12.029.

9. Abd Rahim A. F., Hashim M. R., Ali N. K. High sensitivity of palladium on porous silicon MSM photodetector // *Physica B*. 2011. Vol. 406, no. 4. P. 1034–1037. DOI: 10.1016/j.physb.2010.12.056.

10. Tsui B. Y., Chen M. C. Lowtemperature reaction of thinfilm platinum (300 E) with (100) silicon // *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 68, no. 12. P. 6246–6252. DOI: 10.1063/1.346890.

11. Suryana R., Nakatsuka O., Shigeaki Z. Formation of Palladium Silicide Thin Layers on Si (110) Substrates // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 50, no. 5S1. 05EA09. DOI: 10.1143/JJAP.50.05EA09.

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. Фотоэлементы на основе силицидных контактов PtSi-n-Si и PdSi-n-Si с барьером Шоттки // *Омский научный вестник*. 2019. № 1 (163). С. 50–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-50-54.

Статья поступила в редакцию 18.10.2018 г.

© А. И. Блесман, Р. Б. Бурлаков