

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОЭЛЕМЕНТА, ОСНОВАННОГО НА ДВУХ КОНТАКТАХ Al-*p*-Si И Ti-*p*-Si С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

Задачей исследований является разработка структуры и способа изготовления фотоэлемента, способного принимать излучение либо в ближней инфракрасной области спектра (0,9–4) мкм, либо в области (0,5–1,4) мкм. Рассмотрены способ изготовления и результаты исследования электрических и фотоэлектрических характеристик двухспектрального фотоэлемента, основанного на двух контактах Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки, расположенных на противоположных сторонах Si пластины.

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

Введение. К настоящему времени выполнено большое количество работ, посвященных созданию фотоприемников инфракрасного диапазона длин волн [1], использующих (в частности) барьерные контакты Pt-*p*-Si, Au-*p*-Si, Cr-*p*-Si, Cu-*p*-Si [2–5]. В работах [3, 4] исследованы фотодетекторы, содержащие пластину кремния *p*-типа, на одной стороне которой расположены омический контакт Al-*p*-Si и силицидный контакт PtSi-*p*-Si с барьером Шоттки. При освещении фотодетекторов со стороны контакта PtSi-*p*-Si они действуют в широком спектральном диапазоне, включающем в себя часть ультрафиолетовой, видимую и инфракрасную области спектра. Однако для обеспечения работы этих фотодетекторов требуется их охлаждение до температур (10–80) К. Фотодетектор, предложенный в [5], содержит пластину кремния *p*-типа, на одной стороне которой расположены омический контакт Al-*p*-Si и контакт Cu-*p*-Si с барьером Шоттки, при освещении которого через кремниевую пластину он действует *при комнатной температуре* в ближней инфракрасной области спектра на длине волны 1550 нм. Однако этот фотодетектор обладает ограниченным спектральным диапазоном, так как излучение видимой области спектра сильно поглощается при распространении через кремниевую пластину. Кроме этого, чистая Cu пленка (с толщиной 200 нм) без пассивации уже через 24 часа полностью окисляется и обладает слабой адгезией к кремнию.

Электрические свойства контактов Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки также исследованы в большом количестве работ, например, в [6–10]. Однако информация о фотоэлементах с барьерным контак-

том Al-Si ограничена сведениями об их применении в структурах солнечных элементов [11], а сведения о фотоэлементах с барьерным контактом Ti-Si практически отсутствуют.

Задачей исследований в настоящей работе является разработка 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 и два контакта с барьером Шоттки, расположенные на противоположных сторонах Si пластины *p*-типа: контакт Al-*p*-Si, действующий на основе внутренней фотоэмиссии носителей тока [1, 2], которые возбуждаются в Al пленке при освещении через кремниевую подложку излучением с длинами волн выше длинноволновой границы кремния ($\lambda_{кр} = 1,107$ мкм) и переходят в кремний, когда их энергия превышает высоту барьера $\phi_{вр}$ контакта Al-*p*-Si, и контакт Ti-*p*-Si, освещаемый со стороны полупрозрачного слоя Ti.

Экспериментальные методики и результаты. Структура исследованного в данной работе двухспектрального фотоэлемента представлена на рис. 1, где показаны в увеличенном масштабе вид на двух-

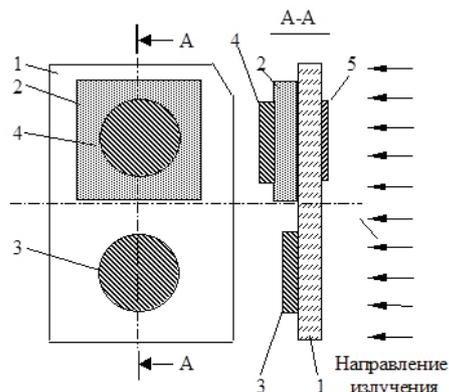


Рис. 1. Вид на двухспектральный фотоэлемент со стороны омического контакта и сечение этого фотоэлемента по плоскости А-А:

- 1 — пластина кремния *p*-типа;
- 2 — омический контакт Al-*p*-Si;
- 3 — контакт Al-*p*-Si с барьером Шоттки;
- 4 — участок пленки Al на омическом контакте;
- 2, 5 — контакт Ti-*p*-Si с барьером Шоттки на полированной стороне пластины *p*-Si

спектральный фотоэлемент со стороны омического контакта и сечение этого фотоэлемента по плоскости А-А. Для изготовления фотоэлемента 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 разделена методом скрайбирования на кремниевые пластины с размерами 8×12 мм². Один из прямоугольных уголков (с длиной катета 1 мм) каждой кремниевой пластины был срезан для визуальной фиксации ее полированной стороны. Затем, после обезжиривания в спирте и ацетоне, две кремниевые пластины наклеивались пицеином полированными плоскостями на стеклянную подложку (20×24 мм²). После этого выполнялось химическое травление при комнатной температуре двух кремниевых пластин, 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 кремниевых пластин от стеклянной подложки они обезжиривались путем трехкратного кипячения в четыреххлористом углеводе и трехкратного кипячения в ацетоне, очищались (от SiO₂) в растворе HF+H₂O (1:1) в течение 70–80 секунд с последующей промывкой в дистиллированной воде и ацетоне.

Затем кремниевые пластины помещались 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 $(1,5–2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., отжигали кремниевые пластины в вакууме в течение 10–15 минут при температуре 120 °С и после этого при температуре 50 °С выполняли локальное осаждение тонкой пленки алюминия толщиной 460 нм путем испарения алюминия из *W* испарителя и осаждения атомов Al через отверстия в маске на протравленные поверхности кремниевых пластин. Затем кремниевые пластины с осажденными контактами Al-

p-Si дополнительно отжигали в вакуумной камере (давление — $(9–10) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) при температуре 540 °С в течение 20 минут в кварцевой трубчатой печи сопротивления, что обеспечивало образование омического контакта 2 к пластине 1 кремния *p*-типа.

После этого перекладывали кремниевые пластины в свободную металлическую маску с отверстиями диаметром 4 мм, которую устанавливали в вакуумную камеру и выполняли локальное осаждение через отверстия в маске пленки алюминия толщиной 360 нм в виде двух дисков 3 и 4 (при давлении $(1,5–2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. и температуре кремниевых пластин 50 °С). Эта операция приводила к образованию контакта 3 с барьером Шоттки (Al-*p*-Si) к кремнию *p*-типа на одной стороне с омическим контактом 2 на протравленной плоскости каждой кремниевой пластины 1.

Контакты Ti-*p*-Si были созданы на полированных плоскостях кремниевых пластин 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. Локальное осаждение тонкой пленки титана толщиной 6,6 нм в виде диска диаметром 4 мм на каждой кремниевой пластине 1 было выполнено при давлении остаточных газов $(1,5–2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. и температуре кремниевых пластин 70 °С, что приводило к образованию контакта 5 (Ti-*p*-Si) с барьером Шоттки в виде диска (расположенного напротив омического контакта 2) к кремнию *p*-типа на полированной стороне (противоположной стороне с омическим контактом 2) каждой кремниевой пластины 1.

Таким образом, в результате реализации вышеописанного технологического процесса на каждой кремниевой пластине 1 был создан фотоэлемент, содержащий омический контакт Al-Si (2) и два контакта 3 и 5 с барьером Шоттки: Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si, расположенные на противоположных сторонах кремниевой пластины 1 (рис. 1) и освещаемые с одной стороны: контакт Al-*p*-Si (3) освещается через кремниевую пластину 1, а контакт Ti-*p*-Si (5) — через полупрозрачный слой Ti (на рис. 1 стрелками показано направление потока излучения).

В данной работе были измерены (при $T=295$ К) электрические характеристики контактов с барьером Шоттки: темновые статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) (с помощью мультиметров М890С и МУ-60) и С-V-характеристики с использованием высококачественного измерителя Е7-9, в котором измерение емкости производится на рабочих частотах (700–300) кГц, а также фотоэлектрические характеристики контактов с барьером Шоттки: спектр фото-э.д.с. в фотовольтаическом режиме (режим холостого хода фотоэлемента) и спектр тока короткого замыкания в фотовольтаическом режиме. На основе использования этих характеристик определена высота барьера Шоттки ϕ_{bp} контактов методами ВАХ и С-V-характеристик, а также фотоэлектрическим методом путем применения спектров тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки [12]. Фотоэлектрические характеристики были измерены 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 измерении фотоэлектрических

Электрические и фотоэлектрические параметры контактов Al-p-Si и Ti-p-Si с барьером Шоттки двух фотоэлементов

№ контакта	ВАХ контакта			Высота барьера			Освещение	
	I_{np} , мкА	$I_{обр}$, мкА	J_0 , А/см ²	Φ_{Bp} , В			75 Вт, L=5 см	
	V=0,6 В	V=0,6 В		ВАХ	C-V	ФЭ	V_{xx} , мВ	$I_{кс}$, мА
1Al-p-Si	1243	13,4	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,79	0,89	0,864	438	0,88
1Ti-p-Si	9984	0,27	$8,7 \cdot 10^{-8}$	0,799	0,88	0,864	412	2,4
2Al-p-Si	1293	0,043	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,79	0,88	0,863	412	2,4
2Ti-p-Si	11595	0,25	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,78	0,88	0,861	398	2,48

Примечание: Первая цифра (1 и 2) в номере контакта — номер образца p-Si.

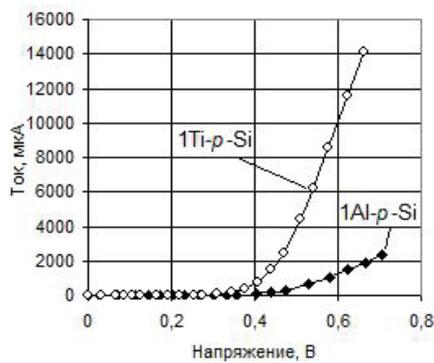


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики контактов № 1 Al-p-Si и № 1 Ti-p-Si с барьером Шоттки при прямой полярности приложенного напряжения

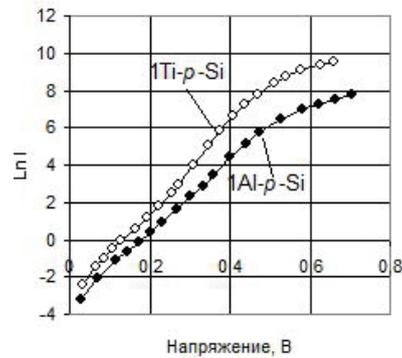


Рис. 3. Зависимости логарифма прямого тока ($\ln I_{np}$) от приложенного напряжения для контактов № 1 Al-p-Si и № 1 Ti-p-Si с барьером Шоттки

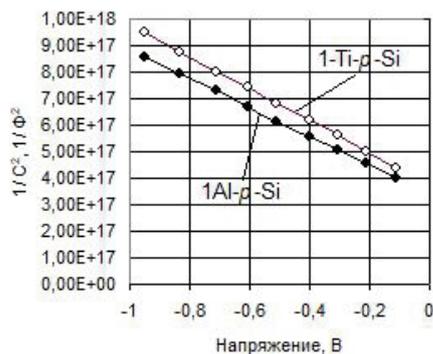


Рис. 4. C-V-характеристики контактов № 1 Al-p-Si и № 1 Ti-p-Si с барьером Шоттки

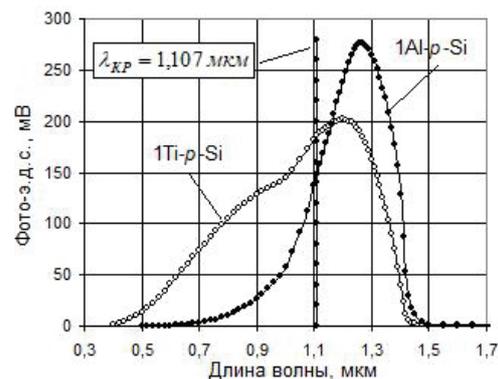


Рис. 5. Спектры фото-э.д.с. контактов № 1 Al-p-Si и № 1 Ti-p-Si с барьером Шоттки

характеристик 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.

Кроме этого, были измерены фото-э.д.с. V_{xx} и ток короткого замыкания $I_{кс}$ каждого контакта с барьером Шоттки при освещении контакта интегральным

светом вольфрамовой лампы накаливания (220 В, 75 Вт) с расстоянием 5 см от нити накала лампы до барьерного контакта, а также определена плотность тока насыщения J_0 на основе использования зависимости логарифма прямого тока ($\ln I_{np}$) от приложенного напряжения. Пересечение прямой $\ln I_{np}(V)$ с вертикальной осью (в результате линейной экстраполяции к $V=0$) определяет $\ln I_0$ и, следовательно, ток насыщения I_0 и плотность тока насыщения $J_0 = I_0/S$, где S — площадь контакта с ба-

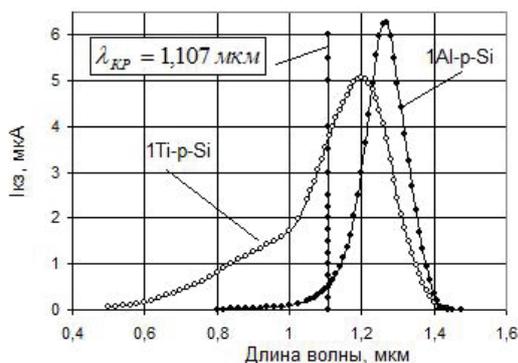


Рис. 6. Спектры тока короткого замыкания контактов № 1 Al-*p*-Si и № 1 Ti-*p*-Si с барьером Шоттки

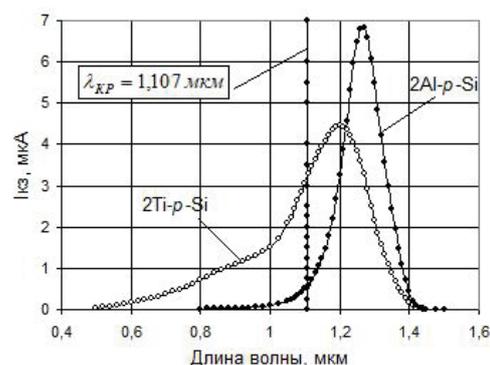


Рис. 7. Спектры тока короткого замыкания контактов № 2 Al-*p*-Si и № 2 Ti-*p*-Si с барьером Шоттки

рьером Шоттки. Результаты измерений указанных выше электрических и фотоэлектрических характеристик контактов с барьером Шоттки, входящих в структуру двухспектральных фотоэлементов, представлены в табл. 1 и на рис. 2–7.

Из представленных в табл. 1 и на рис. 2–3 электрических характеристик контактов с барьером Шоттки двух фотоэлементов следует, что контакты № 1 Al-*p*-Si и № 2 Al-*p*-Si, расположенные на одной плоскости с омическими контактами, имеют ВАХ, сдвинутые в сторону увеличенных значений приложенных прямых напряжений, и уменьшенные в 10 раз прямые токи I_{np} (при $V=0,6$ В), по сравнению с характеристиками контактов № 1 Ti-*p*-Si и № 2 Ti-*p*-Si, расположенных на противоположной стороне пластин *p*-Si напротив омических контактов фотоэлементов, что обусловлено планарным расположением контактов № 1 Al-*p*-Si (или № 2 Al-*p*-Si) и омических контактов и, следовательно, падением напряжения на участке кремниевой пластины между контактом с барьером Шоттки и омическим контактом. Разброс значений обратных токов $I_{обр}$ контактов с барьером Шоттки (при $V=0,6$ В) обусловлен неизбежным наличием как краевых токов утечки барьерных контактов, так и токов утечки через дефекты прижимных внешних зондов к барьерным контактам.

C-V-характеристики контактов с барьером Шоттки Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si исследованных фотоэлементов (на рис. 4 представлены C-V-характеристики контактов № 1 Al-*p*-Si и № 1 Ti-*p*-Si одного из фотоэлементов) были измерены в интервале обратных напряжений V (0,1–0,95) В и являются линейными в координатах $1/C^2(V)$. Линейность этих характеристик позволила определить (в соответствии с работой [12]) точку их пересечения V_1 с осью напряжений V (в результате линейной экстраполяции к $1/C^2=0$), концентрацию акцепторов в кремниевых пластинах и положение уровня Ферми в запрещенной зоне *p*-Si, и высоту барьера Шоттки ϕ_{bp} контактов (табл. 1).

Если в исследованном двухспектральном фотоэлементе используется контакт Al-*p*-Si (3) с барьером Шоттки, освещаемый через кремниевую пластину 1, то из представленных на рис. 5–7 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт (3), следует, что в этом случае он действует в диапазоне длин волн (0,9–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм, т.е. в ближней инфракрасной области спектра. Ограничение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента в видимой обла-

сти 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 носителей тока, которые возбуждаются в Al пленке излучением с длинами волн выше длинноволновой границы кремния ($\lambda_{kp}=1,107$ мкм) и переходят в кремний, когда их энергия превышает высоту барьера ϕ_{bp} контакта Al-*p*-Si.

Если в двухспектральном фотоэлементе используется второй контакт Ti-*p*-Si (5) с барьером Шоттки, освещаемый со стороны полупрозрачного слоя Ti, то из представленных на рис. 5–7 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт (5), 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. 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 Ti (коэффициент пропускания которого равен 0,46) излучение видимой и инфракрасной областей спектра распространяется с частичным поглощением как в слое Ti, так и в кремниевой пластине 1. Поэтому фотоэлемент действует как на основе внутренней фотоэмиссии носителей тока из пленки Ti в кремний, так и на основе генерации электронно-дырочных пар в кремнии.

Кроме этого, из представленных на рис. 5–7 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента видно, что при использовании контакта 3 (Al-*p*-Si) с барьером Шоттки имеют место более высокие значения фото-э.д.с. и тока короткого замыкания на длинах волн максимума этих величин по сравнению со значениями этих величин в случае использования контакта 5 (Ti-*p*-Si) с барьером Шоттки. Это обусловлено тем, что измерение спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлемента, использующего контакт 5 (Ti-*p*-Si), было выполнено с применением зонда, подключаемого к полупрозрачной пленке Ti через тонкую навеску (с размерами 2×2 мм²) индия, которая затеняла часть фотоактивной площади контакта 5 (Ti-*p*-Si).

Заключение. Таким образом, в настоящей работе предложена структура и методика изготовления двухспектрального фотоэлемента, основанного

на двух контактах Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки, 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 ВАХ и C-V-характеристики, а также спектры фото-э.д.с. и тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки двух фотоэлементов, и определена высота барьера Шоттки Φ_{Bp} барьерных контактов методами ВАХ и C-V-характеристик, а также фотоэлектрическим методом на основе использования спектров тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки. Показано, что при использовании контактов Al-*p*-Si, освещаемых через Si пластину, фотоэлементы действуют в диапазоне длин волн (0,9–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм. При использовании контактов Ti-*p*-Si, освещаемых со стороны полупрозрачного слоя Ti, фотоэлементы действуют в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,2 мкм.

Библиографический список

1. Рогольский А. Инфракрасные детекторы: пер. с англ. / под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с. ISBN 5-02-032029-3.
2. 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.
3. Kimata M., Denda M., Iwade S. [et al.]. A Wide Spectral Band Photodetector with PtSi/*p*-Si Schottky-barrier // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1985. Vol. 6, no. 10. P. 1031–1041. DOI: 10.1007/BF01010679.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. Sahin B., Çetin H., Ayyildiz 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.
10. Cetin H., Şahin B., Ayyildiz 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.
11. 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.
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн.: пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.

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

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 Руднарий 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

ПОЛОНЯНКИН Денис Андреевич, кандидат педагогических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» ОмГТУ.

Адрес для переписки: physics@omgtu.ru

Для цитирования

Блесман А. И., Бурлаков Р. Б., Полонянкин Д. А. Электрические и фотоэлектрические свойства фотоэлемента, основанного на двух контактах Al-*p*-Si и Ti-*p*-Si с барьером Шоттки // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 61–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-61-65.

Статья поступила в редакцию 29.01.2019 г.

© А. И. Блесман, Р. Б. Бурлаков, Д. А. Полонянкин