

ФОТОЭЛЕМЕНТ, ИМЕЮЩИЙ ДВА КОНТАКТА Al-p-Si С БАРЬЕРОМ ШОТКИ И ОМИЧЕСКИЙ СИЛИЦИДНЫЙ КОНТАКТ

Рассмотрены способ изготовления и результаты исследования электрических и фотоэлектрических характеристик фотоэлемента, имеющего два непрозрачных контакта с барьером Шоттки Al-p-Si на одной стороне кремниевой пластины и омический силицидный контакт Ni₂Si-p-Si (или Pd₂Si-p-Si), расположенный на противоположной стороне пластины. Показано, что исследованный фотоэлемент может быть использован для преобразования энергии излучения в электрическую энергию при комнатной температуре в ближней инфракрасной области спектра (0,8–1,4) мкм. Это свойство разработанного фотоэлемента позволит расширить его область применения. Фотоэлемент обладает простой структурой и технологией с временем его изготовления в интервале [2,5–3] часа.

Ключевые слова: способ изготовления фотоэлемента, кремний p-типа, контакты с барьером Шоттки Al-p-Si, омический контакт Ni₂Si-p-Si, омический контакт Pd₂Si-p-Si.

Введение. Известны фотодетекторы [1, 2], держащие пластину кремния p-типа, на одной плоскости которой расположены омический контакт Al-p-Si и первый контакт Al-p-Si с барьером Шоттки, освещаемый через кремниевую пластину. Этот фотоэлемент снабжен дополнительно вторым контактом Ti-p-Si с барьером Шоттки, расположенным напротив омического контакта Al-p-Si на плоскости кремниевой пластины, которая противоположна плоскости с омическим контактом Al-p-Si, при этом контакты с барьером Шоттки имеют форму дисков, которые не касаются боковых граней кремниевой пластины. Фотоэлементы действуют *при комнатной температуре* в диапазоне длин волн (0,9–1,4) мкм при использовании контакта Al-p-Si, освещаемого через Si пластину, а при использовании контакта Ti-p-Si, освещаемого со стороны полупрозрачного слоя Ti, он действует в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм.

Следует отметить, что электрические свойства контактов Al-p-Si с барьером Шоттки были исследованы ранее в большом количестве работ, например, в [3–9]. Однако информация о фотоэлементах с барьерным контактом Al-p-Si ограничена сведениями об их применении в структурах солнечных элементов [10, 11]. Кроме этого, конструкционным недостатком фотоэлементов, исследованных в работах [1, 2], является выполнение омического контакта к пластине кремния в виде контакта Al-p-Si, внешняя поверхность которого покрывается пленкой оксида алюминия во время высокотемпературного вжигания (540 °С, 20 минут) пленки алюминия в кремний. В работах [1, 2] с целью последующего формирования MIS (металл-изолятор-полупроводник)-структур

на границах между пленками Al (и Ti) и пластиной p-Si высокотемпературное вжигание пленки алюминия омического контакта в кремний выполняются в вакууме *при давлении остаточных газов* — $(9–10) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., что приводит к окислению алюминия омического контакта и к нестабильности внешнего электрического контакта к фотоэлементам при измерениях их параметров. Задачей исследований в настоящей работе является разработка структуры и способа изготовления фотоэлемента, который не обладает таким конструкционным недостатком. Решение этой задачи заключается в применении тонкопленочных силицидов металлов, которые образуют низкоомные контакты, имеют низкое поверхностное сопротивление и малое проникновение в кремний, обладают высокой стабильностью электрических характеристик и очень хорошей адгезией к кремнию [12–15]. В связи с этим представленные в настоящей работе экспериментальные результаты исследования фотоэлемента, имеющего два контакта с барьером Шоттки Al-p-Si на одной стороне кремниевой пластины и омический силицидный контакт Ni₂Si-p-Si (или Pd₂Si-p-Si), расположенный на противоположной стороне пластины, представляют определенный интерес.

Экспериментальные методики и результаты. Структура исследованного в данной работе фотоэлемента представлена на рис. 1, где показаны в увеличенном масштабе вид на фотоэлемент со стороны пластины кремния с двумя контактами Al-p-Si с барьером Шоттки и сечение этого фотоэлемента по плоскости А-А. Для изготовления фотоэлемента использовалась *полированная с одной стороны* пластина кремния p-типа (марка: 100-2Вк-

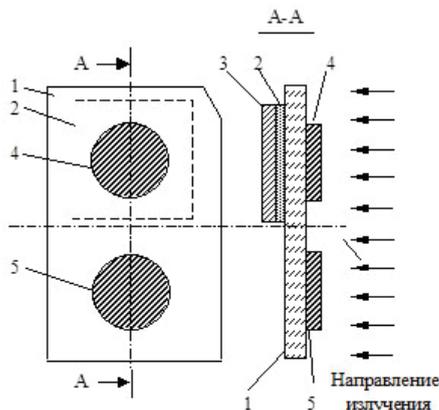


Рис. 1. Вид на экспериментальный образец со стороны полированной поверхности кремниевой пластины и его сечения по А-А: 1 — пластина кремния *p*-типа; 2 — омический силицидный контакт Ni_2Si -*p*-Si (или Pd_2Si -*p*-Si) на неполированной стороне кремниевой пластины 1; 3 — защитная пленка Ag на омическом контакте 2; 4 — контакт Al-*p*-Si с барьером Шоттки, расположенный на полированной плоскости кремниевой пластины 1 (напротив омического контакта 2); 5 — контакт Al-*p*-Si с барьером Шоттки на полированной плоскости кремниевой пластины 1

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 $8 \times 12 \text{ мм}^2$. Один из прямоугольных уголков (с длиной катета 1 мм) каждой кремниевой пластины был срезан для визуальной фиксации ее полированной стороны.

Непосредственно перед вакуумным осаждением металла (никеля) омических контактов кремниевые пластины промывали в этиловом спирте и ацетоне, очищали (от SiO_2) в растворе $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (1:1) в течение 70–80 секунд с последующей промывкой в дистиллированной воде и ацетоне. Затем кремниевые пластины помещали в свободную металлическую маску с прямоугольными отверстиями с размерами $6 \times 5 \text{ мм}^2$, 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 10–12 минут при температуре 230 °С и после этого при этой температуре пластин выполняли локальное осаждение тонкой пленки Ni (с толщиной 36 нм) путем испарения навески никеля с массой 60 мг из *W* испарителя [16] (четыре *W* проволоки длиной 65 мм и диаметром 0,8 мм, соединенные параллельно на всей длине испарителя) и осаждения атомов Ni через отверстия в маске на неполированные поверхности кремниевых пластин с последующим осаждением на пленку Ni (в одном процессе откачки вакуумной камеры) пленки серебра (Ag) толщиной 200 нм путем испарения Ag из танталовой лодочки. Затем пластины кремния с осажденными контактами NiAg 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 формирование силицидных контактов к кремнию *p*-типа, так как температура образования обогащенного металлом силицида никеля Ni_2Si равна 200 °С [12–14, 17–19]. Во время высокотемпературного вжигания (540 °С) осажденных контактов NiAg в кремний в вакууме

при давлении остаточных газов — $(9-10) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. пленка серебра с толщиной 200 нм защищала силицидные омические контакты Ni_2Si -*p*-Si от воздействия молекул остаточных газов, и одновременно с этим происходило образование очень тонкого слоя оксида кремния на поверхности кремниевых пластин вне областей контактов AgNi_2Si -*p*-Si. Поэтому при последующем изготовлении двух контактов Al-*p*-Si с барьером Шоттки на обратной полированной плоскости каждой кремниевой пластины имело место формирование MIS (металл-изолятор-полупроводник)-структур на границе между Al и *p*-Si [10, 11].

Во втором варианте выполнения фотоэлементов в качестве омических контактов к кремниевым пластинам *p*-типа использовались силицидные контакты Pd_2Si -*p*-Si, перед формированием которых кремниевые пластины промывали в этиловом спирте и ацетоне, очищали (от SiO_2) в растворе $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (1:1) в течение 70–80 секунд с последующей промывкой в дистиллированной воде и ацетоне, и затем отжигали пластины 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. Во время высокотемпературного отжига кремниевых пластин в вакууме при давлении остаточных газов — $(9-10) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. происходило образование очень тонкого слоя оксида кремния на поверхности кремниевых пластин. Затем кремниевые пластины помещали в свободную металлическую маску с прямоугольными отверстиями с размерами $6 \times 5 \text{ мм}^2$, 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 220 °С, после чего при этой температуре пластин выполняли локальное осаждение тонкой пленки Pd (с толщиной 32 нм) путем испарения навески палладия с массой 90 мг из вновь изготовленного *W* испарителя [16] (четыре *W* проволоки длиной 65 мм и диаметром 0,8 мм, соединенные параллельно на всей длине испарителя) и осаждения атомов Pd через отверстия в маске на неполированные поверхности кремниевых пластин с последующим осаждением на пленку Pd (в одном процессе откачки вакуумной камеры) пленки серебра (Ag) толщиной 200 нм путем испарения Ag из танталовой лодочки. Так как температура образования обогащенного металлом силицида палладия Pd_2Si равна 200 °С [12, 17–19], то эти вакуумные операции приводили к формированию на пластинах *p*-кремния силицидных контактов Pd_2Si -*p*-Si с защитной Ag пленкой.

Контакты Al-*p*-Si были созданы на полированных плоскостях кремниевых пластин путем термовакуумного испарения навески алюминия (с массой 150 мг) из *W* испарителя [16] (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). Локальное осаждение (через отверстия диаметром 4 мм в маске) пленки Al толщиной 300 нм в виде двух дисков диаметром 4 мм на полированной плоскости каждой кремниевой пластины было выполнено при давлении остаточных газов $(1,5-2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. и температуре кремниевых пластин 120 °С, что приводило к образованию на полированной плоскости каждой кремниевой пластины двух контактов Al-*p*-Si с барьером Шот-

тки, один из которых расположен напротив омического силицидного контакта $Ni_2Si-p-Si$ (или $Pd_2Si-p-Si$) к кремнию p -типа.

Таким образом, в результате реализации вышеописанного технологического процесса на каждой кремниевой пластине 1 был создан фотоэлемент, содержащий силицидный омический контакт 2 ($Ni_2Si-p-Si$, или $Pd_2Si-p-Si$) с защитной Ag пленкой 3, расположенный на *неполированной* стороне пластины 1, и два контакта 4 и 5 ($Al-p-Si$) с барьером Шоттки, расположенные на противоположной *полированной* плоскости кремниевой пластины 1, причем один из них (контакт 4) был расположен напротив омического контакта 2 ($Ni_2Si-p-Si$, или $Pd_2Si-p-Si$) (рис. 1). На рис. 1 стрелками показано направление потока излучения при освещении контактов 4 и 5 ($Al-p-Si$) со стороны пленки Al на полированной поверхности кремниевой пластины 1. Направление потока излучения при освещении контакта 5 ($Al-p-Si$) через кремниевую пластину 1 на рис. 1 не показано.

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 высокочастотного 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

$\Phi_{Вр}$ контактов методами ВАХ и С-V-характеристик, а также фотоэлектрическим методом путем применения спектров тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки [18].

Фотоэлектрические характеристики были измерены 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 измерении фотоэлектрических 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 $I_{кз}$ 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 барьером Шоттки. Результаты измерений указанных выше электрических и фотоэлектрических характе-

Таблица 1

Электрические и фотоэлектрические параметры контактов $Al-p-Si$ с барьером Шоттки четырех фотоэлементов

Тип силицида № барьер. контакта	ВАХ			Высота барьера, $\Phi_{Вр}$, В				Освещение, 75 Вт, $L=5$ см			
	I_{np} , мкА	$I_{обр}$, мкА	J_0 , А/см ²	ВАХ метод	С-V метод	ФЭ метод		со стор. Al		через Si	
						Освещение		V_{xx} , мВ	$I_{кз}$, мА	V_{xx} , мВ	$I_{кз}$, мА
						Al	Si				
$Ni_2Si-p-Si$	0,6 В	0,6 В									
14Al-p-Si	17349	0,112	$3 \cdot 10^{-7}$	0,768	0,845	0,861		426	0,63		
15Al-p-Si	1534	0,028	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,783	0,81	0,857	0,86	422	0,41	440	1,9
24Al-p-Si	19337	0,105	$3 \cdot 10^{-7}$	0,787	0,864	0,861		406	0,84		
25Al-p-Si	1665	0,029	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,787	0,858	0,857	0,86	420	0,91	412	1,57
$Pd_2Si-p-Si$											
34Al-p-Si	25810	0,072	$3 \cdot 10^{-7}$	0,768	0,855	0,861		375	0,52		
35Al-p-Si	1982	0,066	$2,3 \cdot 10^{-7}$	0,774	0,852	0,863	0,86	395	0,62	390	1,56
44Al-p-Si	24502	0,045	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,787	0,854	0,859		388	0,83		
45Al-p-Si	1699	0,029	$2,3 \cdot 10^{-7}$	0,794	0,85	0,861	0,86	408	0,33	403	1,65

Примечание: Первая цифра (1, 2, 3, 4) в номере контакта $Al-p-Si$ — номер пластины $p-Si$. Вторая цифра (4 и 5) в номере контакта $Al-p-Si$ — номер контакта на пластине $p-Si$ (в соответствии с рис. 1). Фотоэлементы с барьерными контактами 14Al-p-Si, 15Al-p-Si, 24Al-p-Si и 25Al-p-Si имеют омические силицидные контакты $Ni_2Si-p-Si$, а фотоэлементы с контактами 34Al-p-Si, 35Al-p-Si, 44Al-p-Si и 45Al-p-Si снабжены силицидными контактами $Pd_2Si-p-Si$. Прямой и обратный токи (I_{np} и $I_{обр}$) контактов приведены для одинаковых (по абсолютному значению $V=0,6$ В) прямом и обратном напряжениях.

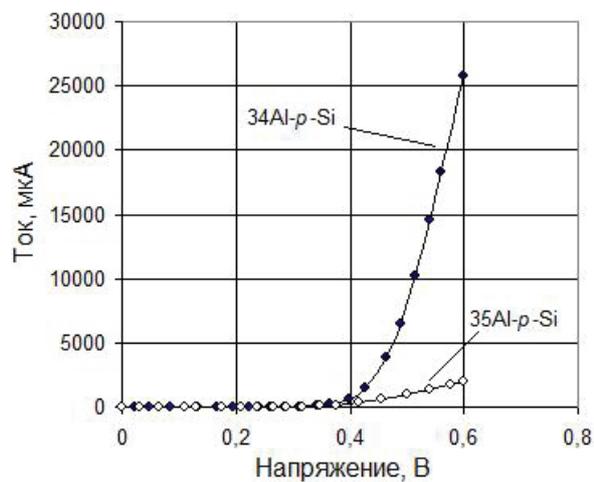


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики контактов 34Al-*p*-Si и 35Al-*p*-Si с барьером Шоттки при прямой полярности приложенного напряжения

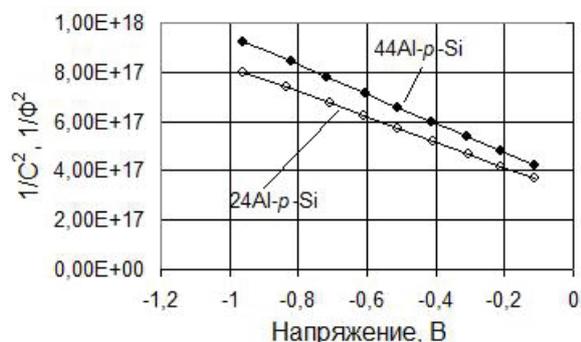


Рис. 3. C-V-характеристики контактов с барьером Шоттки: 24Al-*p*-Si (концентрация акцепторов в *p*-кремнии $N_A=1,47 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и 44Al-*p*-Si (концентрация акцепторов в *p*-кремнии $N_A=1,26 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$)

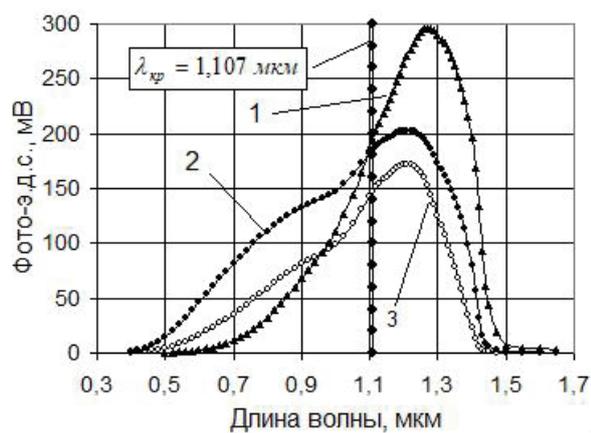


Рис. 4. Спектры фото-э.д.с. контактов с барьером Шоттки: 1 — 25Al-*p*-Si (освещение через Si); 2 — 25Al-*p*-Si (освещение со стороны Al); 3 — 24Al-*p*-Si (освещение со стороны Al)

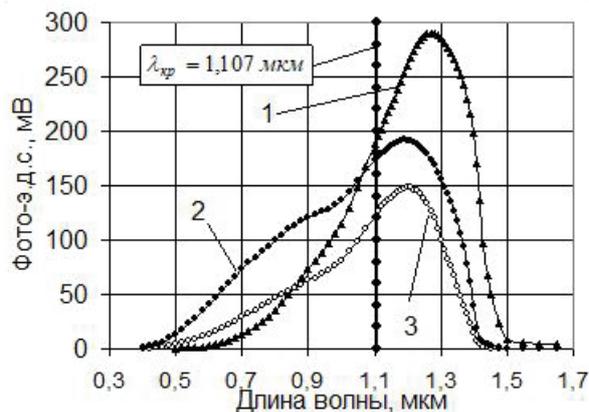


Рис. 5. Спектры фото-э.д.с. контактов с барьером Шоттки: 1 — 45Al-*p*-Si (освещение через Si); 2 — 45Al-*p*-Si (освещение со стороны Al); 3 — 44Al-*p*-Si (освещение со стороны Al)

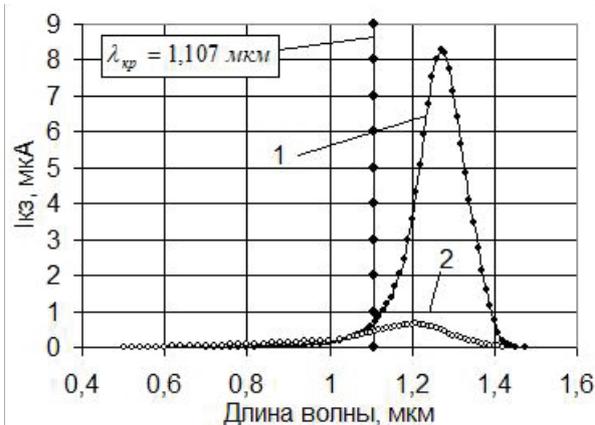


Рис. 6. Спектры тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки: 1 — 25Al-*p*-Si (освещение через Si); 2 — 25Al-*p*-Si (освещение со стороны Al)

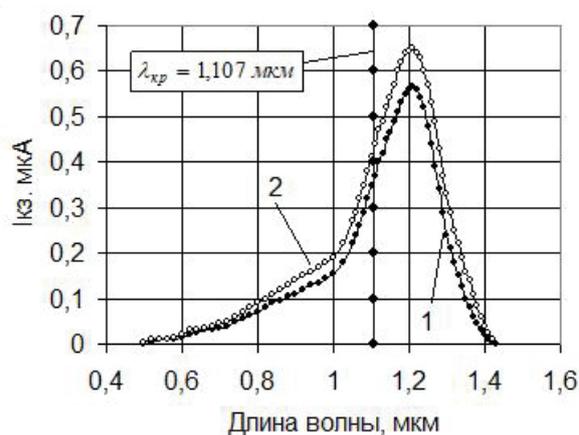


Рис. 7. Спектры тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки: 1 — 24Al-*p*-Si (освещение со стороны Al); 2 — 25Al-*p*-Si (освещение со стороны Al)

ристик контактов с барьером Шоттки, входящих в структуру фотоэлементов, представлены в табл. 1 и на рис. 2–7.

Из представленных в табл. 1 и на рис. 2 электрических характеристик контактов с барьером Шоттки четырех фотоэлементов следует, что контакты 15Al-*p*-Si, 25Al-*p*-Si, 35Al-*p*-Si и 45Al-*p*-Si имеют ВАХ,

сдвинутые в сторону увеличенных значений приложенных прямых напряжений, и уменьшенные прямые токи I_{np} при $V=0,6 \text{ В}$ (в (11,3–11,6) раза в фотоэлементах с силицидными контактами $\text{Ni}_2\text{Si-p-Si}$ и в (13–14,4) раза в фотоэлементах с силицидными контактами $\text{Pd}_2\text{Si-p-Si}$, по сравнению с характеристиками контактов 14Al-*p*-Si, 24Al-*p*-Si, 34Al-*p*-Si

и 44Al-*p*-Si, расположенных на полированной стороне кремниевых пластин напротив омических силицидных контактов двух фотоэлементов. Это сильное различие в ВАХ сравниваемых барьерных контактов в каждом фотоэлементе обусловлено падением напряжения вдоль кремниевой пластины на участке пластины между контактом 5 (Al-*p*-Si) с барьером Шоттки и омическим силицидным контактом 2. Следует отметить, что при $V=0,6$ В прямые токи контактов 34Al-*p*-Si и 44Al-*p*-Si в фотоэлементах с силицидными контактами Pd₂Si-*p*-Si больше в (1,3–1,5) раза прямых токов контактов 14Al-*p*-Si и 24Al-*p*-Si в фотоэлементах с силицидными контактами Ni₂Si-*p*-Si, что обусловлено более высокими удельными контактными сопротивлениями силицидных контактов Ni₂Si-*p*-Si [17]. Разброс значений обратных токов $I_{обр}$ контактов с барьером Шоттки (при $V=0,6$ В) связан с неизбежным наличием как краевых токов утечки барьерных контактов, так и токов утечки через дефекты прижимных внешних зондов к барьерным контактам.

C-V-характеристики контактов Al-*p*-Si с барьером Шоттки исследованных фотоэлементов (на рис. 3 представлены не совпадающие C-V-характеристики двух контактов 24Al-*p*-Si и 44Al-*p*-Si двух фотоэлементов, изготовленных на пластинах кремния с различными концентрациями акцепторов: 24Al-*p*-Si — $N_A = 1,47 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и 44Al-*p*-Si — $N_A = 1,26 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) 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 [18]) 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 Al-*p*-Si (табл. 1).

На рис. 4 представлены спектры фото-э.д.с. в фотовольтаическом режиме двух барьерных контактов: 25Al-*p*-Si и 24Al-*p*-Si в фотоэлементе с силицидным контактом Ni₂Si-*p*-Si для случаев освещения контакта 25Al-*p*-Si через кремниевую пластину (спектр 1) и со стороны пленки Al (спектр 2), а контакта 24Al-*p*-Si только со стороны пленки Al (спектр 3). На рис. 5 представлены аналогичные спектры фото-э.д.с. двух барьерных контактов: 45Al-*p*-Si и 44Al-*p*-Si в фотоэлементе с силицидным контактом Pd₂Si-*p*-Si для аналогичных условий освещения барьерных контактов. Из представленных на рис. 4–6 спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлементов следует, что при освещении барьерных контактов Al-*p*-Si (5) через кремниевую пластину 1 фотоэлементы действуют в диапазоне длин волн (0,8–1,4) 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 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 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 [20, 21].

Если в исследованных фотоэлементах контакты Al-*p*-Si с барьером Шоттки освещаются со стороны пленки Al, то из спектров фото-э.д.с. и тока ко-

роткого замыкания, представленных на рис. 4, 5, 7, следует, что в этом случае фотоэлементы 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 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 в видимую область спектра обусловлено тем, что при освещении фотоэлемента со стороны непрозрачной пленки Al (с толщиной 300 нм) излучение видимой и инфракрасной областей спектра воздействует как на кольцевые зоны областей пространственного заряда непрозрачных контактов Al-*p*-Si, так и на области кремния под непрозрачными контактами Al-*p*-Si в результате отраженный излучения от границ раздела воздух-кремний и кремний-металл при перпендикулярном падении излучения на фотоэлемент. Поэтому в этом случае фотоэлементы действуют как на основе внутренней фотоэмиссии носителей тока из пленки Al в кремний, так и на основе генерации электронно-дырочных пар в кремнии.

Из спектров фото-э.д.с. и тока короткого замыкания фотоэлементов, показанных на рис. 4–6, также видно, что при освещении контактов Al-*p*-Si с барьером Шоттки через кремниевую пластину 1, 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 освещения контактов Al-*p*-Si со стороны непрозрачной пленки Al. При сравнении спектров тока короткого замыкания (см. рис. 6) значение отношения сравниваемых величин находится в интервале (14–17) раз. Этот факт связан с малыми значениями тока короткого замыкания, максимальные значения которого находятся в интервале (0,5–0,6) мкА при освещении контактов Al-*p*-Si со стороны пленки Al (рис. 7), так как пленка Al имеет толщину 300 нм и поэтому непрозрачна в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм.

Закключение. Таким образом, в настоящей работе рассмотрена структура и методика изготовления фотоэлемента, основанного на двух непрозрачных контактах Al-*p*-Si с барьером Шоттки и омическом силицидном контакте Ni₂Si-*p*-Si (или Pd₂Si-*p*-Si). Контакты Al-*p*-Si с барьером Шоттки расположены на одной полированной стороне Si пластины и могут освещаться с противоположных направлений. Контакт Al-*p*-Si с барьером Шоттки, расположенный напротив омического контакта, освещается со стороны пленки Al, а второй контакт Al-*p*-Si — с противоположных направлений (через пластину кремния и со стороны пленки Al). Измерены ВАХ и C-V-характеристики, а также спектры фото-э.д.с. и тока короткого замыкания контактов с барьером Шоттки четырех 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 барьерных контактов. Показано, что при освещении контактов Al-*p*-Si через Si пластину фотоэлементы действуют в диапазоне длин волн (0,8–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,27 мкм. При освещении контактов Al-*p*-Si со стороны пленки Al фотоэлементы действуют в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм с максимумом на длине волны 1,2 мкм, который значительно ниже максимума на длине волны 1,27 мкм в случае освещения барьерного контакта через пла-

стину кремния, так как пленка Al имеет толщину 300 нм и вследствие этого непрозрачна в диапазоне длин волн (0,5–1,4) мкм. Поэтому при использовании рассмотренного в данной работе фотоэлемента целесообразным является применение барьерного контакта Al-*p*-Si, расположенного напротив омического силицидного контакта Ni₂Si-*p*-Si (или Pd₂Si-*p*-Si), для электрических измерений ВАХ и C-V-характеристик, а также концентрации акцепторов в кремниевой пластине и положения уровня Ферми в запрещенной зоне *p*-Si, а второго барьерного контакта Al-*p*-Si, освещаемого через пластину кремния, для преобразования энергии излучения в электрическую энергию при комнатной температуре в ближней инфракрасной области спектра (0,8–1,4) мкм и для измерения высоты барьера Шоттки ϕ_{bp} фотоэлектрическим методом.

Применение в данной работе силицидного омического контакта Ni₂Si-*p*-Si (или Pd₂Si-*p*-Si), защищенного Ag пленкой, позволило существенно улучшить стабильность внешнего электрического контакта к фотоэлементу во время измерения его параметров. Использование двух непрозрачных контактов Al-*p*-Si с барьером Шоттки на одной плоскости фотоэлемента упростило методику его изготовления и сократило время технологического процесса.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Tatarogly A., Altundal 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.
5. Türüt A., Yalçın N., Sağlam M. Parameter extraction from non-ideal C-V characteristics of Schottky diode with and without interfacial layer // Solid-State Electronics. 1992. Vol. 35, no. 6. P. 835–841. DOI: 10.1016/0038-1101(92)90286-L.
6. Yıldız D. E., Altundal S. On the temperature dependence of series resistance and interface states in Al/SiO₂/*p*-Si (MIS) Schottky diodes // Microelectronic Engineering. 2008. Vol. 85. P. 289–294. DOI: 10.1016/j.mee.2007.06.015.
7. Dökme İ. The effect of series resistance and oxide layer formed by thermal oxidation on some electrical parameters of Al/SiO₂/*p*-Si Schottky diodes // Physica B. 2007. Vol. 388. P. 10–15. DOI: 10.1016/j.physb.2006.04.032.
8. Kanbur H., Altundal Ş., Tatarogly A. The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/*p*-

Si Schottky diodes // Applied Surface Science. 2005. Vol. 252. P. 1732–1738. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.03.122.

9. Dökme İ., Altundal Ş., Bülbül M. M. The barrier height inhomogeneity in Al/*p*-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer // Applied Surface Science. 2006. Vol. 252. P. 7749–7754. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.09.046.

10. Charlson E. J., Lien J. C. An Al *p*-silicon MOS photovoltaic cell // Journal of Applied Physics. 1975. Vol. 46, no. 9. P. 3982–3987. DOI: 10.1063/1.322149.

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. Tu K. N. Selective growth of metal-rich silicide of noble metals // Applied Physics Letters. 1975. Vol. 27, no. 4. P. 221–224. DOI: 10.1063/1.88436.

13. Guo X., Yu H., Jiang Y.-L. [et al.]. Study of nickel silicide formation on Si (110) substrate // Applied Surface Science. 2011. Issue 24. P. 10571–10575. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.07.052.

14. Tsuchiya Y., Tobioka A., Nakatsuka O. [et al.]. Electrical Properties and Solid-Phase Reactions in Ni/Si(100) Contacts // Japanese Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 41, Part 1, no. 4B. P. 2450–2454. DOI: 10.1143/JJAP.41.2450.

15. Suryana R. [et al.]. Formation of Palladium Silicide Thin Layers on Si (110) Substrates // Japanese Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 50. 05EA09. DOI: 10.1143/JJAP.50.05EA09.

16. Пат. 188587 Российская Федерация, МПК C23C 14/24. Испаритель с изменяемой геометрией для вакуумного нанесения тонких пленок / Бурлаков Р. Б., Кузин А. Г. № 2018125350; заявл. 10.07.18; опубл. 17.04.19, Бюл. № 11.

17. Бурлаков Р. Б. Измерение удельного сопротивления силицидных омических контактов к кремнию *p*-типа методом линии передачи // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 169–173. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-169-173.

18. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн.: пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.

19. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера; пер. с англ. под ред. В. Ф. Киселева, В. В. Поспелова. М.: Мир, 1982. 576 с.

20. Рогальский А. Инфракрасные детекторы / пер. с англ. под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.

21. 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.

БУРЛАКОВ Рудий Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Прикладная и медицинская физика».

AuthorID (РИНЦ): 37654

Адрес для переписки: BurlakovRB@omsu.ru

Для цитирования

Бурлаков Р. Б. Фотоэлемент, имеющий два контакта Al-*p*-Si с барьером Шоттки и омический силицидный контакт // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 86–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-86-91.

Статья поступила в редакцию 24.03.2020 г.

© Р. Б. Бурлаков