

Электрические и фотоэлектрические свойства анизотипных гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$

© М.Н. Солован[¶], В.В. Брус⁺, П.Д. Марьянчук

Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
58012 Черновцы, Украина

⁺ Черновицкое отделение Института проблем материаловедения Национальной академии наук Украины,
58001 Черновцы, Украина

(Получена 18 октября 2012 г. Принята к печати 31 октября 2012 г.)

Фоточувствительные гетероструктуры $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ изготовлены напылением тонкой пленки нитрида титана (n -типа проводимости) методом реактивного магнетронного распыления на полированные поликристаллические пластины кремния p -типа проводимости. Измерены вольт-амперные характеристики гетероструктур при различных температурах. Исследованы температурные зависимости высоты потенциального барьера и последовательного сопротивления гетероперехода $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$. Определены доминирующие механизмы токопереноса через гетеропереход при прямом и обратном смещениях. Гетероструктуры генерируют напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.4\text{ В}$ и ток короткого замыкания $I_{sc} = 1.36\text{ мА/см}^2$ при освещении с плотностью мощности 80 мВт/см^2 .

1. Введение

В последние годы проводятся интенсивный поиск и исследования различных перспективных материалов и структур на их основе для применения в высокоэффективных фотоэлектрических устройствах. Использование гетероструктур для изготовления фотоэлектрических преобразователей расширяет их функциональные возможности и повышает эксплуатационные характеристики по сравнению с фотоэлектрическими приборами на основе гомопереходов [1–3].

Нитрид титана (TiN) — это перспективный широкозонный материал, который обладает удачной совокупностью физико-химических параметров: низкое удельное сопротивление, достаточно высокий коэффициент пропускания в видимой части спектра, высокая твердость, высокая износостойкость, высокая химическая инертность и стойкость к коррозии [4–6].

Нитрид титана используется в оптических фильтрах, тонкопленочных резисторах, защитных и декоративных покрытиях [7,8].

Кремний является самым распространенным полупроводниковым материалом в электронике. В связи с большими запасами кремния и совершенством отработанных технологий возможно промышленное производство солнечных элементов на его основе. Однако основным препятствием для снижения стоимости солнечных элементов на монокристаллическом кремнии является дороговизна технологии его получения. Альтернативой монокристаллическому кремнию является поликристаллический кремний. Поликристаллический кремний имеет более низкую себестоимость, поскольку для его получения используется более простая технология.

Благодаря своим физическим свойствам TiN и поликристаллический Si являются перспективными материалами для применения в различных фотоэлектрических

приборах [9,10], поэтому исследование анизотипных гетероструктур $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ на основе поликристаллического кремния представляет значительный интерес.

Насколько нам известно, в литературе отсутствуют результаты детальных исследований механизмов токопереноса и электрических свойств гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$. Указанные исследования имеют важное значение для дальнейшей разработки приборов на основе гетероперехода $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ для электроники и солнечной энергетики, так как на эффективность работы полупроводниковых приборов на основе гетеропереходов существенно влияют электрические характеристики компонент гетеропереходов и металлургической границы раздела [11].

В данной работе исследуются электрические и фотоэлектрические свойства гетероструктур, сформированных путем нанесения тонкопленочного TiN n -типа проводимости на поликристаллические подложки Si p -типа проводимости методом реактивного магнетронного распыления.

2. Экспериментальная часть

Для изготовления гетероструктур использовали поликристаллический кремний p -типа проводимости. Значения удельной электропроводимости и концентрации носителей заряда этих кристаллов при комнатной температуре ($T = 295\text{ К}$) составляли $\sigma = 9.5 \cdot 10^{-3}\text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $p = 2 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$ соответственно. Глубина залегания уровня Ферми относительно края валентной зоны для базового материала ($E_F - E_v = 0.28\text{ эВ}$) определялась из выражения для концентрации равновесных дырок: $p = 2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2} \exp[-(E_F - E_v)/kT]$, где m_p — эффективная масса дырок, T — температура, k — постоянная Больцмана.

Нанесение пленок TiN проводилось на полированные подложки поликристаллического Si типоразмером $5 \times 5 \times 1\text{ мм}$ в универсальной вакуумной установке

[¶] E-mail: solovan-86@mail.ru

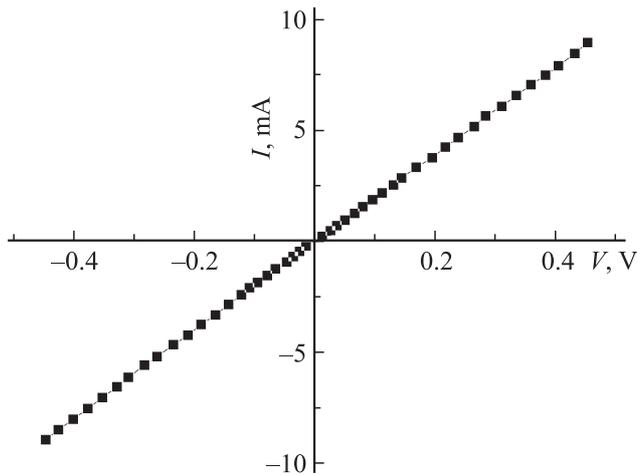


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика индиевого контакта к тонкой пленке TiN.

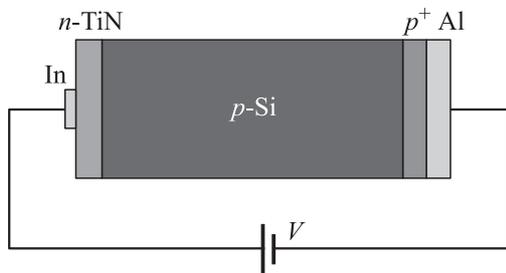


Рис. 2. Схематическое изображение анизотипной гетероструктуры $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$.

Leybold-Heraeus L560 с помощью реактивного магнетронного распыления мишени чистого титана в атмосфере смеси аргона и азота при постоянном напряжении.

Титановая мишень — шайба диаметром 100 мм и толщиной 5 мм — размещалась на столике магнетрона с водяным охлаждением на расстоянии 7 см под подложками. Подложки поликристаллического кремния и ситалла размещались над магнетроном с последующим вращением столика для обеспечения однородности пленок по толщине. Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

Формирование газовой смеси аргона и азота в необходимой пропорции происходило из двух независимых источников в течение процесса напыления. Для удаления неконтролируемого загрязнения поверхности мишени и подложек использовали кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона. В течение процесса напыления парциальные давления в вакуумной камере составляли 0.35 Па для аргона и 0.7 Па для азота. Установленная мощность магнетрона — 120 Вт. Процесс напыления длился 15 мин при температуре подложек 573 К.

Для определения электрических параметров тонких пленок одновременно проводили их напыление на ситалловые подложки. Полученные пленки TiN имели

n -тип проводимости. Их удельная электропроводность и концентрация носителей заряда при температуре 295 К составили соответственно: $\sigma = 0.17 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $n = 1.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

На сегодняшний день в литературе отсутствует детальное исследование электрических свойств омических контактов к тонким пленкам TiN, поэтому нами были напылены на тонкие пленки TiN три различных металла (индий, хром и титан) для определения, какой из них создает омический контакт с нитридом титана. После этого с помощью трехзондового метода были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) контактов.

При исследовании ВАХ $I(V)$ металлических контактов на тонких пленках TiN установлено, что критериям омичности контакта (малое удельное сопротивление, линейность и симметричность ВАХ) отвечает лишь индиевый контакт. ВАХ индиевого контакта изображена на рис. 1.

После проведенных исследований фронтальный точечный электрический контакт к тонкой пленке TiN формировался методом термического осаждения индия при температуре подложки ~ 400 К. Тыльный омический контакт к $p\text{-Si}$ получали нанесением слоя Al методом термического испарения в высоком вакууме. Для диффузии атомов Al в приповерхностную область Si проводили термический отжиг (при температуре ~ 800 К в течение 20 мин); образующийся при этом p^+ -слой снижает контактное сопротивление [12].

Схематическое изображение анизотипной гетероструктуры приведено на рис. 2.

Вольт-амперные характеристики гетероструктур $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ измеряли с помощью комплекса SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

3. Результаты и их обсуждение

Энергетическая диаграмма исследуемого анизотипного гетероперехода $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ в соответствии с моделью Андерсона [13], без учета поверхностных электрических состояний и диэлектрического слоя, была построена на основе значений энергетических параметров полупроводников, взятых из литературных источников [14–17] (рис. 3). Положения уровня Ферми E_F относительно краев зон в $n\text{-TiN}$ и $p\text{-Si}$, $\Delta\mu_n$ и $\Delta\mu_p$, определены с учетом экспериментально полученных значений концентраций носителей заряда в TiN и Si соответственно.

Для расчета толщины обедненных n - и p -областей в TiN и Si можно использовать следующие выражения [13]:

$$d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 N_A \varepsilon_n \varepsilon_p \varphi_0}{e N_D (\varepsilon_n N_D + \varepsilon_p N_A)}},$$

$$d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 N_D \varepsilon_n \varepsilon_p \varphi_0}{e N_A (\varepsilon_n N_D + \varepsilon_p N_A)}}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, ε_0 — электрическая постоянная ($8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$), ε_n и N_D — относительная

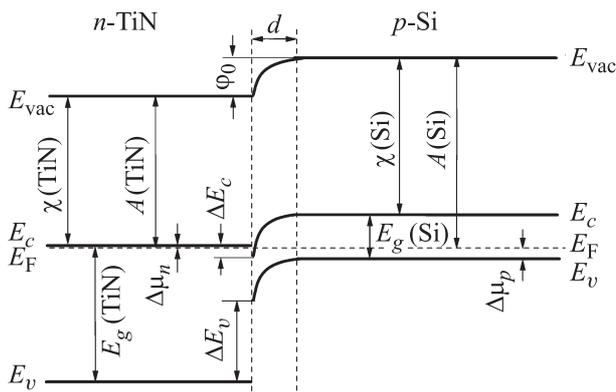


Рис. 3. Энергетическая диаграмма анизотипной гетероструктуры *n-TiN/p-Si*: $E_g(\text{TiN}) = 3.4$ эВ, $\chi(\text{TiN}) = 3.69$ эВ, $A(\text{TiN}) = 3.75$ эВ, $E_g(\text{Si}) = 1.12$ эВ, $\chi(\text{Si}) = 4.05$ эВ, $A(\text{Si}) = 4.89$ эВ, $\Delta\mu_n = 0.05$ эВ, $\Delta\mu_p = 0.28$ эВ, $\Delta E_c = 0.31$ эВ, $\Delta E_v = 1.96$ эВ, $\phi_0 = 1.14$ эВ. E_c — край зоны проводимости, E_v — край валентной зоны, E_g — ширина запрещенной зоны, χ — сродство к электрону, A — работа выхода, E_{vac} — уровень вакуума.

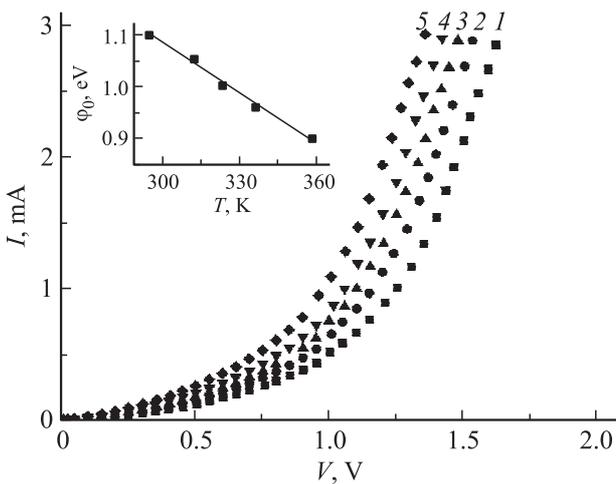


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики гетероперехода *n-TiN/p-Si* при температурах T , К: 1 — 295, 2 — 313, 3 — 323, 4 — 336, 5 — 358. На вставке — температурная зависимость высоты потенциального барьера ϕ_0 .

диэлектрическая проницаемость и концентрация доноров в TiN, ϵ_p и N_A — относительная диэлектрическая проницаемость и концентрация акцепторов в Si, ϕ_0 — высота потенциального барьера.

Определенные значения d_n и d_p составляют $3.1 \cdot 10^{-11}$ и $2.6 \cdot 10^{-6}$ м соответственно. Поскольку $d_p \gg d_n$, можно считать, что область пространственного заряда гетероструктуры *n-TiN/p-Si* полностью формируется в Si ($d_p = d$).

На рис. 4 приведены прямые ветви вольт-амперной характеристики анизотипного гетероперехода *n-TiN/p-Si*, измеренные при различных температурах.

Путем экстраполяции линейных участков ВАХ до пересечения с осью напряжений определены значения

высоты потенциального барьера ϕ_0 гетероперехода при различных температурах ($\phi_0 = eV_{bi}$, где V_{bi} — контактная разность потенциалов). Установлено, что температурная зависимость высоты потенциального барьера гетероструктуры *n-TiN/p-Si* (см. вставку на рис. 4) хорошо описывается уравнением

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi T, \quad (2)$$

где $\beta_\phi = 3.2 \cdot 10^{-3}$ эВ · К⁻¹ — температурный коэффициент высоты потенциального барьера, $\phi_0(0) = 2.06$ эВ — значение высоты потенциального барьера исследуемой гетероструктуры при абсолютном нуле температуры.

Стоит заметить, что большие значения β_ϕ и $\phi_0(0)$ обусловлены высокой концентрацией поверхностных состояний N_{ss} (дислокации несоответствия) на границе гетероперехода. В первом приближении $N_{ss} \sim x^{-2}$ [13,18], где x — расстояние между дислокациями несоответствия, которое определяется из следующего выражения:

$$x = a_{\text{Si}} a_{\text{TiN}} / (a_{\text{Si}} - a_{\text{TiN}}). \quad (3)$$

Используя значения постоянной решетки нитрида титана $a_{\text{TiN}} = 4.24$ Å [15] и кремния $a_{\text{Si}} = 5.43$ Å [18], получим $x = 19.3$ Å и соответственно $N_{ss} = 2.67 \cdot 10^{13}$ см⁻². При такой плотности поверхностные состояния могут играть роль центров захвата или рекомбинации и существенно влиять на электрические свойства гетероструктур [19–21].

Величину последовательного сопротивления гетероструктуры R_s можно определить из наклона прямой ветви ВАХ. Видно, что в области напряжений больше высоты потенциального барьера кривые $I(V)$ переходят от экспоненциального закона к линейному. Это свидетельствует о том, что напряжение на барьерной области гетероперехода перестает изменяться, т.е. барьер практически открыт, а ток через гетеропереход ограничивается его последовательным сопротивлением R_s . Определенное значение R_s составляет 70 Ом. Известно, что из наклона температурной зависимости в координатах $\ln R_s = f(10^3/T)$ можно определить глубину залегания рабочего акцепторного уровня, который определяет свойства базового материала [22,23]. Однако полученные экспериментальные данные свидетельствуют о температурной независимости последовательного сопротивления. Это обусловлено тем, что рабочий акцепторный уровень является истощенным в исследуемом интервале температур.

Условия прохождения тока через гетеропереход *n-TiN/p-Si* усложняются вследствие относительно высокой концентрации поверхностных состояний, оцененной по формуле (3).

Анализ прохождения носителей заряда сквозь энергетический барьер в прямом направлении указывает на доминирование двух механизмов токопереноса. ВАХ (рис. 5) при небольших прямых смещениях ($3kT/e < V < 0.5$ В) хорошо описывается урав-

нением (3)

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

где I_0 — ток насыщения, n — показатель неидеальности. Определенные из начальных линейных участков ВАХ ($3kT/e < V < 0.5$ В) значения показателя неидеальности изменяются от 4.8 до 3.5 с повышением температуры от 295 до 358 К (см. вставку на рис. 5), что свидетельствует о доминировании механизма токопереноса, обусловленного генерационно-рекомбинационными процессами в области пространственного заряда через глубокий энергетический уровень, расположенный посередине запрещенной зоны, с участием энергетически активных поверхностных ловушек, размещенных на металлургической границе раздела исследуемого гетероперехода [24,25].

При увеличении прямого смещения ($V > 0.5$ В) наклон наблюдаемых линейных участков $\ln I = f(V)$ не зависит от температуры. Это обстоятельство исключает возможность анализа токопереноса на основе генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда [21]. Постоянный наклон зависимостей $\ln I = f(V)$ при различных температурах можно рассматривать как свидетельство туннельной природы механизма токопереноса [13,14]. Поэтому доминирующим механизмом токопереноса, учитывая выше оцененную высокую концентрацию дислокаций несоответствия N_{ss} , можно считать туннельно-рекомбинационные процессы с участием поверхностных состояний на границе раздела TiN/Si. В этом случае ток при прямом смещении определяется следующим выражением [14]:

$$I = B \exp\{-A[\varphi_0(T) - eV]\}, \quad (5)$$

где A — характеристика материала, B — величина, которая слабо зависит от температуры и напряжения, φ_0 — высота потенциального барьера.

Перепишем выражение (5) в другой форме:

$$I = B \exp[-A\varphi_0(T)] \exp(AeV) = I_0 \exp(AeV), \quad (6)$$

где $I_0 = B \exp[-A\varphi_0(T)]$ — ток отсечки, который не зависит от приложенного напряжения. Из выражения (6) видно, что наклон начальных участков прямых ветвей ВАХ в координатах рис. 5 определяет коэффициент A , который принимает значение 3.1 эВ^{-1} .

Учитывая ранее определенную температурную зависимость высоты потенциального барьера $\varphi_0(T)$, формулу (2), выражение для тока отсечки можно представить в виде [26]

$$I_0 = B \exp\{-A[\varphi_0(0) - \beta_\varphi T]\} = B \exp[-A\varphi_0(0)] \times \exp(A\beta_\varphi T) = I_c \exp(A\beta_\varphi T), \quad (7)$$

где $I_c = \text{const}$.

На вставке к рис. 5 изображена температурная зависимость $I_0 = f(T)$ в полулогарифмических координатах. Коэффициент A можно повторно определить из наклона линейной зависимости $\ln I_0 = f(T)$:

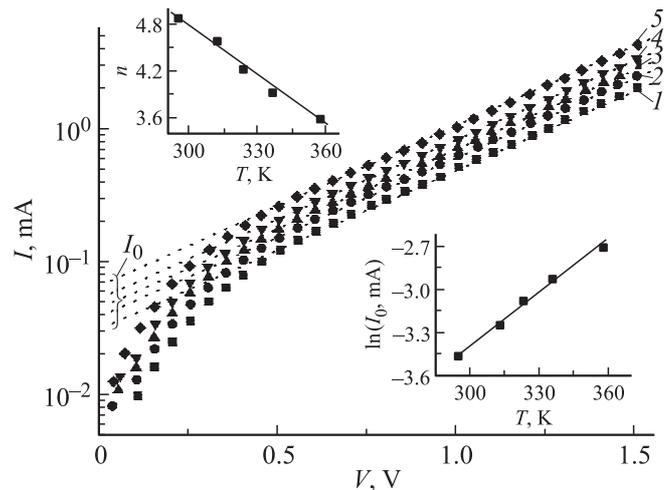


Рис. 5. Прямые ветви ВАХ гетероперехода в полулогарифмическом масштабе при температурах $T, \text{ К}$: 1 — 295, 2 — 300, 3 — 315, 4 — 329, 5 — 343. На вставках — температурные зависимости показателя неидеальности и тока отсечки.

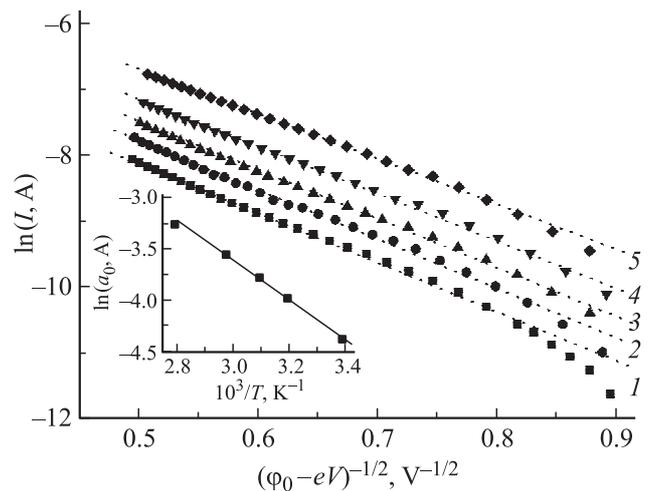


Рис. 6. Туннелирование через исследуемый гетеропереход при обратном смещении при температурах $T, \text{ К}$: 1 — 295, 2 — 313, 3 — 323, 4 — 336, 5 — 358. На вставке — температурная зависимость параметра a_0 .

$A = \beta_\varphi^{-1} (\Delta \ln I_0 / \Delta T) = 3.5 \text{ эВ}^{-1}$. Хорошее согласие значений коэффициента A , определенных из различных зависимостей (формулы (6) и (7)), подтверждает достоверность анализа начальных участков ВАХ гетероперехода $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ в рамках туннельно-рекомбинационного механизма токопереноса с участием поверхностных состояний на границе раздела TiN/Si.

Проведенный анализ механизмов токопереноса через исследуемую гетероструктуру $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ при обратном смещении показал, что в области напряжений $0.12 < |V| < 2$ В зависимость $I(V)$ хорошо описывается в рамках туннельной модели токопереноса. В случае резкого перехода выражение для туннельного тока при

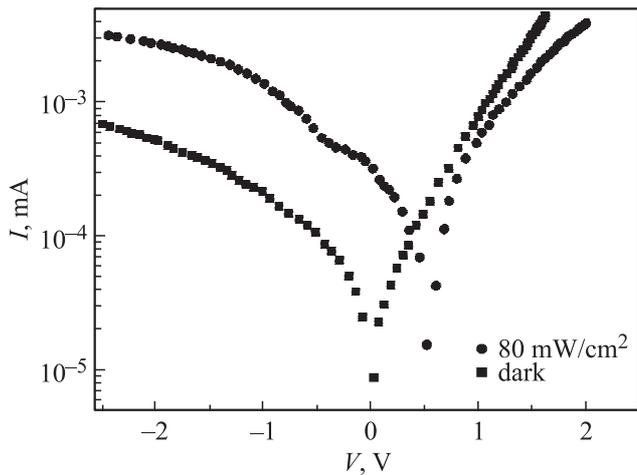


Рис. 7. Темновая и световая ВАХ гетероперехода *n-TiN/p-Si* в полулогарифмическом масштабе.

обратном смещении имеет вид [13,26]

$$I \approx a_0 \exp\left(\frac{b_0}{\sqrt{\varphi_0(T) - eV}}\right), \quad (8)$$

где a_0 — параметр, определяющийся вероятностью заполнения энергетических уровней, с которых происходит туннелирование, b_0 определяет скорость изменения тока с напряжением. Таким образом, согласно уравнению (7), аппроксимация обратных ветвей ВАХ прямыми линиями в координатах $\ln I = f((\varphi_0 - eV)^{-1/2})$ (рис. 6) подтверждает доминирование туннельного механизма токопереноса.

Как отмечалось выше, параметр a_0 определяется вероятностью заполнения энергетического уровня, с которого происходит туннелирование при обратном смещении. Известно, что из наклона температурной зависимости $\ln a_0 = f(10^3/T)$ можно определить глубину его залегания [25], которая составляет 0.32 эВ (см. вставку на рис. 6).

На рис. 7 представлены темновая и световая вольт-амперные характеристики гетероструктуры *n-TiN/p-Si*. Как видно из рис. 7, при освещении с плотностью мощности 80 мВт/см² обратный ток возрастает по сравнению с темновым. Гетероструктура имеет максимальное напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.4$ В и ток короткого замыкания $I_{sc} = 1.36$ мА/см². Малые значения V_{oc} и I_{sc} могут быть связаны с негативным влиянием проколов тонкой пленки, наличием электрических диполей на гетерогранице и рекомбинацией через поверхностные состояния [27,28]. Возможными путями устранения этих негативных факторов являются модификация поверхности кремниевой подложки, использование дополнительного промежуточного слоя и дальнейшая оптимизация технологических режимов напыления тонких пленок TiN с целью формирования высококачественных гетеропереходов TiN/Si. После проведения описанных мероприятий и улучшения выходных фотоэлектрических параметров

данной гетероструктуры она может быть успешно использована для изготовления различных фотоэлектрических полупроводниковых приборов (фотодиодов, солнечных элементов).

4. Заключение

Методом реактивного магнетронного распыления изготовлены фоточувствительные гетероструктуры *n-TiN/p-Si*. Измерены вольт-амперные характеристики металлических контактов к тонкой пленке TiN, а также вольт-амперные характеристики гетероструктуры при различных температурах. Установлено, что омическим электрическим контактом к тонкой пленке нитрида титана является индиевый контакт.

Исследованы температурные зависимости высоты потенциального барьера и последовательного сопротивления анизотипного гетероперехода *n-TiN/p-Si*.

Установлено, что токоперенос через гетероструктуру при прямом смещении хорошо описывается в рамках генерационно-рекомбинационной и туннельно-рекомбинационной моделей с участием поверхностных состояний. Основным механизмом переноса носителей заряда через гетеропереход при обратном смещении является туннелирование сквозь область пространственного заряда.

Из вышесказанного становится понятным тот факт, что все доминирующие механизмы токопереноса через гетеропереход *n-TiN/p-Si* напрямую связаны с влиянием поверхностных состояний на границе раздела двух полупроводников.

Относительно большая поверхностная концентрация дислокаций несоответствия на границе раздела TiN/Si, $N_{ss} \approx 2.67 \cdot 10^{13}$ см⁻², негативно влияет на условия токопереноса и фотоэлектрического преобразования в гетеропереходах. Как следствие получаем низкие фотоэлектрические параметры: напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.4$ В и ток короткого замыкания $I_{sc} = 1.36$ мА/см² при освещении с плотностью мощности 80 мВт/см².

Стоит отметить, что исследованный гетеропереход был получен без оптимизации технологических условий и дополнительной обработки. Очевидно, что изменение технологических параметров напыления пленки TiN, модификация поверхности Si, отжиг сформированных гетеропереходов в различных средах, а также внедрение дополнительных промежуточных слоев могут уменьшить концентрацию поверхностных состояний на границе раздела TiN/Si и тем самым повысить эффективность фотоэлектрического преобразования. Один из перечисленных подходов станет предметом нашего исследования в ближайшем будущем.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32**, 3 (1998).
- [2] T. Soga. *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion* (Amsterdam, Elsevier, 2006).

- [3] V.V. Brus. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 035 024 (2012).
- [4] M.Y. Al-Jaroudi, H.T.G. Hentzel, S.E. Hornstrom, A. Bengston. *Thin Sol. Films*, **190**, 265 (1990).
- [5] S. Kadelec, J. Musil, J. Vyskocil. *Surf. Coat. Technol.*, **54–55**, 287 (1992).
- [6] G. Gagnon, J.F. Currie, C. Beique, J.L. Brebner, S.G. Gujrathi, L. Onllet. *J. Appl. Phys.*, **75**, 1565 (1994).
- [7] U. Beck, G. Reiners, I. Urban, K. Witt. *Thin Sol. Films*, **220**, 234 (1992).
- [8] R.C. Glass, L.M. Spellman, S. Tanaka, R.F. Davis. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **10**, 1625 (1992).
- [9] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya. *Solar Energy*, **85**, 1580 (2011).
- [10] C.B. Greenberg. *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 3332 (1993).
- [11] F. Yakuphanoglu, M. Caglar, Y. Caglar, S. Ilican. *J. Alloys Comp.*, **506**, 188 (2010).
- [12] K.Z. Yahiya, A.H. Jareeze, A.M. Al-Baldawi. *Eng. & Tech.*, **26**, 257 (2008).
- [13] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987) [Пер. с англ.: A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion* (N.Y., 1983)].
- [14] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979) [Пер. с англ.: B.L. Sharma, R.K. Purohit. *Semiconductor heterojunctions* (Pergamon Press, 1974)].
- [15] Г.В. Самсонов. *Нитриды* (Киев, Наук. думка, 1969) с. 133.
- [16] Г.П. Лучинский. *Химия титана* (М., Химия, 1971) с. 168.
- [17] Г.В. Самсонов, И.М. Виницкий. *Тугоплавкие соединения* (М., Металлургия, 1976).
- [18] К. Чопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986) [Пер. с англ.: K.L. Chopra, S.R. Das. *Thin film solar cells* (Plenum Press, N.Y., 1981)].
- [19] В.В. Брус, М.И. Илащук, В.В. Хомяк, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницький. *ФТП*, **46**, 1175 (2012).
- [20] V.V. Brus, M.I. Pashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 055 008 (2012).
- [21] P.M. Gorley, Z.M. Grushka, V.P. Makhniy, O.G. Grushka, O.A. Chervinsky, P.P. Horley, Yu.V. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez. *Phys. Status Solidi C*, **5**, 3622 (2008).
- [22] М.Н. Солован, П.Д. Марьянчук, В.В. Брус, О.А. Парфенюк. *Неорг. матер.*, **48**, 1154 (2012).
- [23] В.В. Брус, М.И. Илащук, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницький, Б.Н. Грицюк. *ФТП*, **45**, 1109 (2011).
- [24] P.M. Gorley, Z.M. Grushka, V.P. Makhniy, O.G. Grushka, O.A. Chervinsky, P.P. Horley, Yu.V. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez. *Phys. Status Solidi C*, **5**, 3622 (2008).
- [25] V.P. Makhniy, S.V. Khusnutdinov, V.V. Gorley. *Acta Phys. Polonica A*, **116**, 859 (2009).
- [26] V.V. Brus, M.I. Pashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanytsky. *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 125 006 (2011).
- [27] V.V. Brus. *Solar Energy*, **86**, 786 (2012).
- [28] V.V. Brus. *Solar Energy*, **86**, 1600 (2012).

Редактор Л.В. Шаронова

Electric and photoelectric properties of anisotype heterojunctions n -TiN/ p -Si

M.M. Solovan, V.V. Brus⁺, P.D. Maryanchuk

Yuri Fedkovych Chernivtsi National University,
58012 Chernivtsi, Ukraine
⁺ Chernivtsi Department
of Institute of Materials Science Problems,
National Academy of Sciences of Ukraine,
58001 Chernivtsi, Ukraine

Abstract Photosensitive heterojunctions n -TiN/ p -Si were prepared by deposition of titanium nitride thin film (n -type conductivity) using the DC reactive magnetron sputtering onto polished polycrystalline silicon substrate with p -type conductivity. The current–voltage characteristics of the heterojunctions under investigation were measured at different temperatures. The temperature dependence of the potential barrier height and the series resistance of the n -TiN/ p -Si heterojunctions were investigated. The dominating mechanisms of current transport through the heterojunctions were determined under forward and reverse biases. The heterojunctions produce the open circuit voltage $V_{oc} = 0.4$ V and the short circuit current $I_{sc} = 1.36$ mA/cm² under illumination with power density 80 mW/cm².