

# Электрические и фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$

© М.Н. Солован<sup>\*+</sup>, А.И. Мостовой<sup>\*</sup>, В.В. Брус<sup>\*\*</sup>, Э.В. Майструк<sup>\*</sup>, П.Д. Марьянчук<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,  
58012 Черновцы, Украина

<sup>+</sup> Politecnico di Torino,  
10129 Torino, Italia

<sup>\*\*</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH,  
12489 Berlin, Germany

E-mail: m.solovan@chnu.edu.ua

(Получена 29 декабря 2015 г. Принята к печати 14 января 2016 г.)

Гетероструктуры  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  получены путем напыления тонкой пленки нитрида титана (TiN)  $n$ -типа проводимости на подготовленные пластины  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$   $p$ -типа проводимости с помощью реактивного магнетронного распыления. Исследованы их электрические и фотоэлектрические свойства, а также проанализированы доминирующие механизмы токопереноса при прямом смещении в рамках туннельно-рекомбинационной и туннельной моделей. Полученные структуры  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  имеют следующие фотоэлектрические параметры при интенсивности освещения  $80 \text{ мВт/см}^2$ : напряжение холостого хода  $V_{OC} = 0.52 \text{ В}$ , ток короткого замыкания  $I_{SC} = 0.265 \text{ мА/см}^2$  и коэффициент заполнения  $FF = 0.39$ .

## 1. Введение

Повышение надежности работы атомных электростанций и устройств космической техники требует использования радиационно-стойкой электроники [1]. Создание полупроводниковых приборов со стабильными параметрами и воспроизводимыми характеристиками, которые могут эксплуатироваться при различных внешних воздействиях, в том числе в условиях высокоэнергетической радиации, связано с выбором базовых материалов, отвечающих определенным требованиям [2]. Согласно работе [3], таким требованиям отвечает дефектный полупроводник  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . Вследствие большого количества стехиометрических вакансий этот материал почти всегда обладает электронной или собственной проводимостью. В связи с этим технология изготовления анизотипных гетеропереходов на его основе существенно усложняется. В данной работе нами выращены монокристаллы  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$   $p$ -типа проводимости, это существенно расширяет возможности их практического применения для радиационно-стойких приборов электроники и оптоэлектроники на основе гетеропереходов.

В свою очередь, тонкие пленки нитрида титана (TiN) находят широкое практическое применение в различных полупроводниковых устройствах [4–6] благодаря удачной совокупности физико-химических параметров: низкое удельное сопротивление, достаточно высокий коэффициент пропускания в видимой части спектра, высокий коэффициент отражения в инфракрасной части спектра, высокая твердость, высокая износостойкость, хорошая химическая инертность и устойчивость к коррозии [7–11].

Благодаря своим физическим свойствам  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  и TiN являются перспективными материалами для применения в различных фотоэлектрических радиационно-

стойких приборах, поэтому создание и исследование анизотипных гетероструктур  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  представляет значительный интерес.

В нашей предыдущей работе [11] был впервые создан гетеропереход  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  путем нанесения тонкопленочного TiN на подложки  $p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . Однако для дальнейшей оптимизации параметров этих гетероструктурных фотодиодов необходимы детальные исследования их температурных зависимостей электрических и фотоэлектрических свойств, результаты которых приведены в данной работе.

## 2. Методика эксперимента

Для изготовления гетеропереходов использовались монокристаллы  $p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ , выращенные методом Бриджмена. Из измерений коэффициента Холла и коэффициента термоэдс для монокристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  установлено, что в явлениях переноса участвуют дырки, т. е. кристаллы имеют  $p$ -тип проводимости.  $p$ -тип проводимости может быть обусловлен дополнительными вакансиями ртути, которые образовались вследствие подбора технологических параметров роста монокристаллов.

Нанесение пленок TiN проводилось на полированную поверхность монокристаллического  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  (типоразмером  $5 \times 5 \times 0.6 \text{ мм}$ ) в универсальной вакуумной установке Laybold-Heraeus L560 с помощью реактивного магнетронного распыления мишени чистого титана (99.99%) в атмосфере смеси аргона и азота при постоянном напряжении.

Подложки монокристаллического  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  размещались над магнетроном с последующим вращением столика для обеспечения однородности пленок по толщине. Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ .

Для удаления не контролируемого загрязнения (органических загрязнений и собственного оксида) с 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  $\sim 570$  К.

Фронтальный электрический контакт к тонкой пленке TiN формировался методом термического напыления индия [12]. Омический контакт к подложке создавался вплавлением индия.

Вольт-амперные характеристики гетероструктур  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> измеряли с помощью комплекса SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Электрические свойства

На рис. 1 приведены прямые ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) анизотипного гетероперехода  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>, измеренные при различных температурах.

Путем экстраполяции линейных участков ВАХ до пересечения с осью напряжений определены значения высоты потенциального барьера гетероперехода при различных температурах (см. вставку на рис. 1). Установлено, что температурная зависимость высоты потенциального барьера гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> хорошо описывается уравнением

$$\varphi_0(T) = \varphi_0(0) - \beta_\varphi T, \quad (1)$$

где  $\beta_\varphi = 1.00 \cdot 10^{-2}$  эВ  $\cdot$  К<sup>-1</sup> — температурный коэффициент высоты потенциального барьера, а  $\varphi_0(0) = 3.99$  эВ — значение высоты потенциального барьера исследуемой гетероструктуры при абсолютном нуле температуры.

Стоит отметить, что определенная высота потенциального барьера гетероперехода  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> при комнатной температуре ( $\varphi_k = eV_{bi} = 0.76$  эВ, где  $V_{bi}$  — встроенный потенциал) значительно превышает аналогичный параметр для гетеропереходов с использованием собственного полупроводника Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> или  $n$ -типа проводимости ( $\varphi_k = 0.3$ – $0.4$  эВ) [13,14]. Большое значение высоты потенциального барьера гетероперехода  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> обусловлено разным типом проводимости материала окна и базы.

Величину последовательного сопротивления  $R_s$  гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> можно определить из наклона прямой ветви вольт-амперной характеристики [15]. Видно, что в области напряжений больше высоты потенциального барьера кривые  $I = f(V)$  (рис. 1)

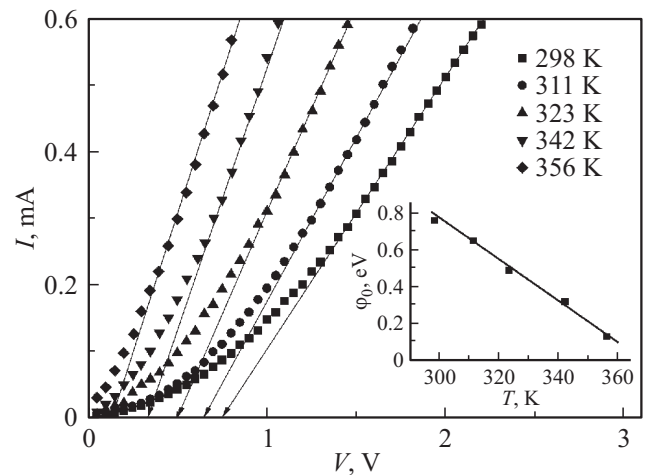


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> при различных температурах  $T$ . На вставке — зависимость высоты потенциального барьера  $\varphi_0$  от температуры.

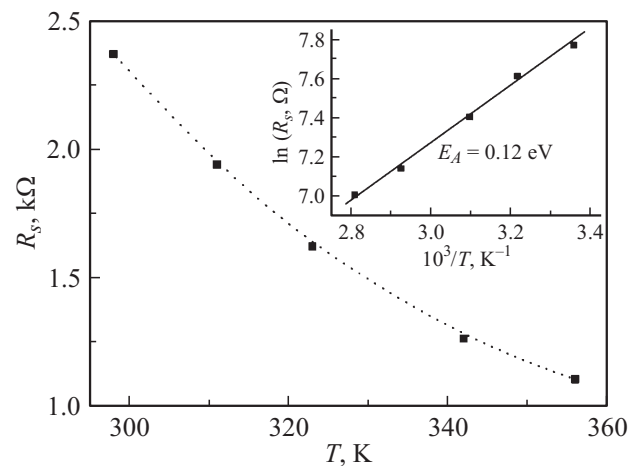


Рис. 2. Зависимость последовательного сопротивления гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> от температуры. На вставке — зависимость  $R_s(10^3/T)$  в полулогарифмических координатах.

переходят из экспоненциальной зависимости в линейную. Это свидетельствует о том, что напряжение на барьерных областях гетероперехода перестает изменяться, т.е. барьер практически открыт, а ток через гетеропереход ограничивается его последовательным сопротивлением  $R_s$ .

Температурная зависимость последовательного сопротивления приведена на рис. 2. Известно, что из наклона температурной зависимости  $\ln(R_s) = f(10^3/T)$  можно определить глубину залегания рабочего акцепторного уровня  $E_A = 0.12$  эВ, который определяет свойства базового материала [16,17]. Можно допустить, что найденный уровень в Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>  $p$ -типа проводимости, который является базовым материалом в исследуемых гетеропереходах, соответствует акцепторным центрам, которые образуют вакансии ртуты.

### 3.2. Механизмы токопереноса

На рис. 3 изображены прямые ветви вольт-амперных характеристик гетероперехода в полулогарифмических координатах при различных температурах. В области прямых смещений  $V > 3kT/e$  наблюдаются прямолинейные участки, свидетельствующие об экспоненциальной зависимости тока от напряжения.

Стоит отметить, что наклон прямолинейных участков ( $3kT/e < V < 0.8\text{ В}$ )  $\Delta \ln(I)/\Delta V$  не зависит от температуры. Это обстоятельство исключает возможность анализа механизмов токопереноса, основываясь на генерационно-рекомбинационных процессах в области пространственного заряда, так как для этого случая должна наблюдаться температурная зависимость наклона прямолинейных участков вольт-амперных характеристик в полулогарифмических координатах  $\Delta \ln(I)/\Delta V = e/nkT$ , где  $n$  — коэффициент неидеальности [18]. Постоянный наклон зависимостей  $\ln(I) = f(V)$  при различных температурах можно рассматривать как свидетельство туннельной природы механизма токопереноса [19,20].

Прямолинейные участки ВАХ с одинаковыми наклонами начинаются при малых смещениях, при которых область пространственного заряда еще не достаточно узкая для прямого туннелирования, которое описывается формулой Ньюмена [21]. Поэтому единственным физически обоснованным механизмом токопереноса можно считать многоступенчатые туннельно-рекомбинационные процессы с участием поверхностных состояний на границе раздела  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . В этом случае ток при прямом смещении определяется следующим выражением [21]:

$$I = B \exp(-\alpha(\varphi_0(T) - eV)), \quad (2)$$

$$\alpha \approx \frac{4}{3\hbar} \left( \frac{m_n^* \varepsilon_0 \varepsilon_n}{N_D} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

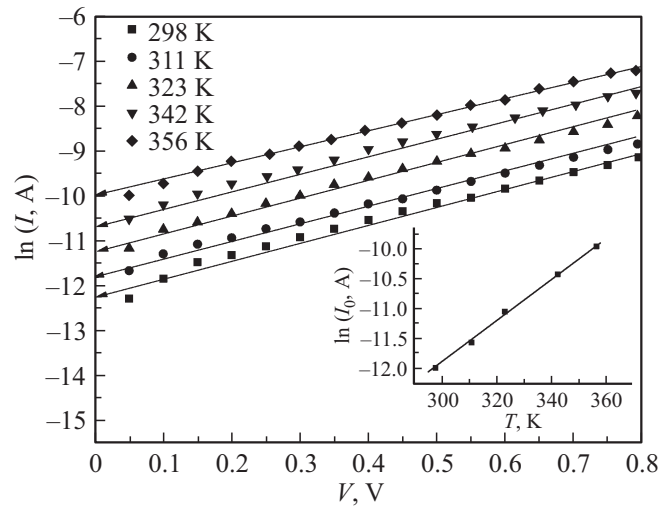
где  $B$  — величина, которая слабо зависит от температуры и напряжения,  $\varphi_0$  — высота потенциального барьера,  $m_n^*$ ,  $N_D$ ,  $\varepsilon_n$  — эффективная масса электрона, концентрация доноров и относительная диэлектрическая проницаемость TiN соответственно.

Перепишем выражение (2) в другой форме:

$$I = B \exp(-\alpha\varphi_0(T)) \exp(\alpha eV) = I_0 \exp(\alpha eV), \quad (4)$$

где  $I_0 = B \exp(-\alpha\varphi_0(T))$  — ток отсечки, который не зависит от приложенного напряжения. Из выражения (6) видно, что наклон  $\Delta \ln(I)/\Delta V$  начальных участков прямых ветвей ВАХ, изображенных на рис. 3, определяет коэффициент  $\alpha$ , который принимает значение  $3.6 \text{ эВ}^{-1}$ .

Учитывая ранее определенную температурную зависимость высоты потенциального барьера  $\varphi_0(T)$  из формулы (1), выражение для тока отсечки можно представить



**Рис. 3.** Прямые ветви ВАХ гетероперехода в полулогарифмическом масштабе при различных температурах. На вставке — температурная зависимость тока отсечки.

в виде

$$I_0 = B \exp(-\alpha(\varphi_0(0) - \beta_\varphi T)) = B \exp(-\alpha\varphi_0(0)) \exp(\alpha\beta_\varphi T) = I_c \exp(\alpha\beta_\varphi T), \quad (5)$$

где  $I_c = \text{const}$ .

На вставке к рис. 3 изображена температурная зависимость  $\ln(I_0) = f(T)$  в полулогарифмических координатах. Коэффициент  $\alpha$  можно повторно определить из наклона прямолинейной зависимости  $\ln(I_0) = f(T)$ :  $\alpha = \beta_\varphi^{-1} (\Delta \ln(I_c) / \Delta T) = 3.53 \text{ эВ}^{-1}$ . Хорошее совпадение значений коэффициента  $\alpha$ , определенного из различных зависимостей (формулы (4) и (5)), подтверждает достоверность анализа начальных участков вольт-амперных характеристик гетероперехода  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  в рамках многоступенчатого туннельно-рекомбинационного механизма токопереноса с участием поверхностных состояний на границе раздела TiN/Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>.

Небольшой постоянный наклон экспериментальных зависимостей прямолинейных участков  $\Delta \ln(I)/\Delta V$  в области напряжений  $V > 0.8 \text{ В}$  (рис. 4) при различных температурах можно рассматривать как свидетельство туннельной природы механизма токопереноса. Прямолинейные участки ВАХ с одинаковыми наклонами начинаются при достаточно больших смещениях, при которых область пространственного заряда достаточно узка для прямого туннелирования, которое описывается формулой Ньюмена для туннельного механизма токопереноса с учетом влияния последовательного сопротивления:

$$I = I_t^0 \exp(\beta T) \exp[\gamma(V - IR_s)], \quad (6)$$

$I_t^0$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  — постоянные. Экспериментальное значение  $\gamma = 6$  было определено из зависимости  $\ln(I) = f(V - IR_s)$ .

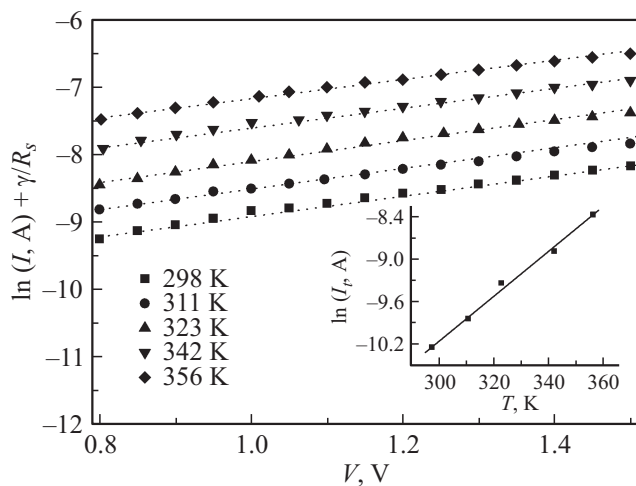


Рис. 4. Прямые ветви ВАХ гетероструктуры в полулогарифмическом масштабе ( $V > 0.8$  В). На вставке — температурная зависимость тока отсечки.

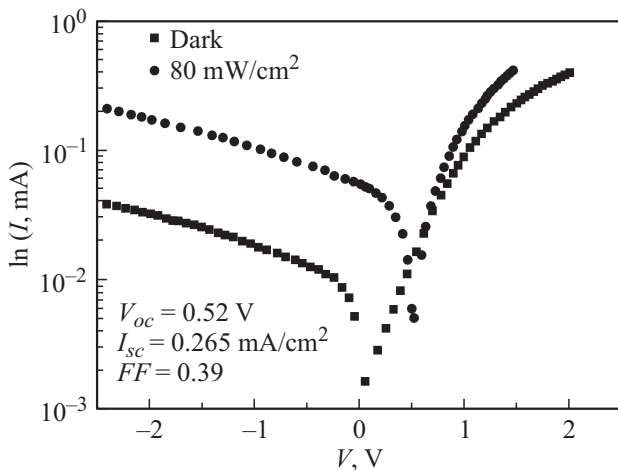


Рис. 5. Темновая и световая ВАХ гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> в полулогарифмическом масштабе.

Прологарифмируем выражение (6) и получаем:

$$\ln(I) + \gamma IR_s = \ln(I_t) + \gamma V, \quad (7)$$

где  $I_t = I_t^0 \exp(\beta T)$  — ток отсечки.

Температурная зависимость  $\ln(I_t) = f(T)$  в полулогарифмических координатах изображена на вставке к рис. 4. Путем экстраполяции линии на ось  $\ln(I_t)$  определен  $I_t^0$ , который составляет  $3.01 \cdot 10^{-9}$  А. Наклон данной линии дает коэффициент  $\beta$ , равный  $3.1 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

#### 4. Фотоэлектрические характеристики

На рис. 5 представлены темновая и световая вольт-амперные характеристики гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> в полулогарифмическом масштабе.

Как видно из рис. 5, при освещении  $80 \text{ мВт/см}^2$  обратный ток возрастает по сравнению с темновым. Гетероструктура имеет напряжение холостого хода  $V_{oc} = 0.52 \text{ В}$ , ток короткого замыкания  $I_{sc} = 0.265 \text{ мА/см}^2$  и коэффициент заполнения  $FF = 0.39$ .

Малое значение  $I_{sc}$  может быть связано с рекомбинацией через глубокие поверхностные состояния на гетерогранице и большим последовательным сопротивлением  $R_s = 3.1 \text{ кОм}$  [22–24].

Возможными путями устранения этих негативных факторов являются модификация поверхности подложки Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>, использование дополнительного промежуточного слоя и дальнейшая оптимизация технологических режимов напыления тонких пленок TiN с целью формирования более качественных гетеропереходов TiN/Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>.

#### 5. Вольт-фарадные характеристики

На рис. 6 изображены вольт-фарадные характеристики анизотипного гетероперехода  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>, измеренные при комнатной температуре. Прямолинейный участок свидетельствует о равномерном распределении нескомпенсированных акцепторов в соответствующих областях базового материала.

Проводя экстраполяцию линейного участка до пересечения с осью напряжений, определяем величину встроенного потенциала  $V'_{bi} = 0.84 \text{ В}$  [25,26], который больше величины встроенного потенциала определенного с ВАХ исследуемого гетероперехода при комнатной температуре  $V_{bi} = 0.76 \text{ В}$ . Это различие обусловлено влиянием электрически заряженных поверхностных ловушек на гетерогранице TiN/Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>. Известно, что присутствие электрического заряда захваченного на границе раздела гетероперехода влияет на ширину области пространственного заряда и, следовательно, на барьерную емкость. Барьерную емкость резкого асимметрично-

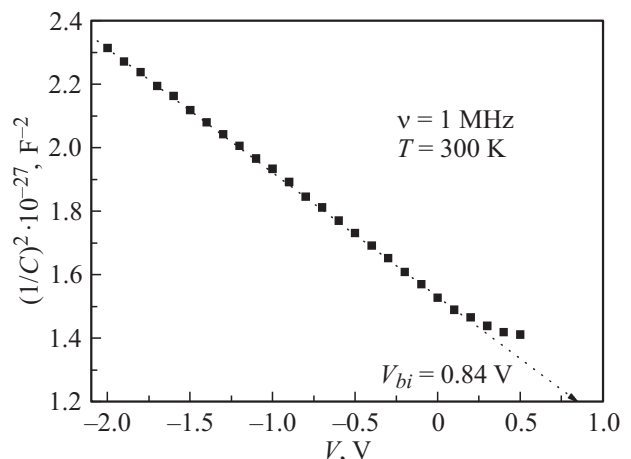


Рис. 6. Вольт-фарадные характеристики гетероструктуры  $n$ -TiN/ $p$ -Hg<sub>3</sub>In<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>, измеренные при частоте переменного сигнала 1 МГц и  $T = 300 \text{ К}$ .

го электрического перехода с заряженной границей раздела  $C_b$  можно рассчитать по следующей формуле [27]:

$$C_b = S \sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon N}{2\left(V_{bi} \pm \frac{Q_{ss}^2}{2\varepsilon_0\varepsilon qN} - V\right)}}, \quad (8)$$

где  $Q_{ss}$  — электрический заряд, который захвачен на границе перехода. Знак „+“ используется в уравнении (8), когда электрический заряд захвачен на границе перехода и имеет противоположный знак к пространственному заряду в области обеднения (ширина области пространственного заряда  $W$  больше и, таким образом, барьерная емкость  $C_b$  меньше).

Из уравнения (8) видно, что экстраполяция линейной зависимости  $(1/C)^2$  от  $V$  до пересечения с осью напряжения дает нам  $V'_{bi} = V_{bi} + Q_{ss}^2/2\varepsilon_0\varepsilon qN$  вместо действительного значения встроенного потенциала  $V_{bi}$ . В нашем случае область пространственного заряда расположена в  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  и формируется положительно заряженными ионизированными акцепторами. Напряжение  $V'_{bi}$ , определенное из вольт-фарадной характеристики, больше, чем встроенное напряжение  $V_{bi}$ , которое определяется из ВАХ из-за наличия захваченных электронов (отрицательный электрический заряд) на гетерогранице  $\text{TiN}/\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ .

## 6. Заключение

Получены фоточувствительные анизотипные гетероструктуры  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  путем напыления тонкой пленки нитрида титана ( $n$ -типа проводимости) методом реактивного магнетронного распыления на монокристаллические пластины  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$   $p$ -типа проводимости. Исследованы температурные зависимости высоты потенциального барьера и последовательного сопротивления анизотипного гетероперехода  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ .

Из анализа температурных зависимостей прямых ветвей ВАХ гетероперехода установлено, что доминирующим механизмом токопереноса при малых смещениях ( $3kT/e < V < 0.8$  В) являются многоступенчатые туннельно-рекомбинационные процессы с участием поверхностных состояний на металлургической границе раздела  $\text{TiN}/\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . При  $V > 0.8$  В доминирующим механизмом токопереноса является туннелирование Ньюмена.

Прямолинейный участок на вольт-фарадной характеристике анизотипного гетероперехода  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  свидетельствует о равномерном распределении нескомпенсированных акцепторов в соответствующих областях базового материала.

Установлено, что гетероструктуры генерируют напряжение холостого хода  $V_{OC} = 0.52$  В, ток короткого замыкания  $I_{SC} = 0.265$  мА/см<sup>2</sup> и коэффициент заполнения  $FF = 0.39$  при освещении 80 мВт/см<sup>2</sup>.

## Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан. ФТП, **38**, 129 (2004).
- [2] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32**, 3 (1998).
- [3] О.Г. Грушка, В.Т. Маслюк, С.М. Чупыра, О.М. Мыслюк, С.В. Биличук, И.И. Заболоцкий. ФТП, **46**, 327 (2012).
- [4] X. Lu, G. Wang, T. Zhai, M. Yu, S. Xie, Y. Ling, C. Liang, Y. Tong, Y. Li. Nano Lett., **12**, 5376 (2012).
- [5] V.M. Vinokur, T.I. Baturina, M.V. Fistul, A.Yu. Mironov, M.R. Baklanov, C. Strunk. Nature, **452** (3), 613 (2008).
- [6] M. Tao, D. Udeshi, S. Agarwal, E. Maldonado, W.P. Kirk. Sol. St. Electron., **48**, 335 (2004).
- [7] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук, Т.Т. Ковалюк, J. Rappich, M. Gluba. ФТТ, **5** (11), 2123 (2013).
- [8] М.Н. Солован, В.В. Брус, Э.В. Майструк, П.Д. Марьянчук. Неорг. матер., **50** (1), 46 (2014).
- [9] Р.А. Андриевский, З.М. Дашевский, Г.В. Калинин. Письма ЖТФ, **30**, 1 (2004).
- [10] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук, И.М. Фодчук, В.М. Лоренц, А.М. Слетов, М.М. Слетов, М. Gluba. Опт. и спектр., **113** (5), 63 (2014).
- [11] М.Н. Солован, Э.В. Майструк, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. Письма ЖТФ, **40** (6), 1 (2014).
- [12] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук, ФТП, **47**, 1185 (2013).
- [13] Л.А. Косяченко, Ю.С. Паранчич, В.Н. Макогоненко, В.М. Склярчук, Е.Ф. Склярчук, И.И. Герман. ЖТФ, **73**, 126 (2003).
- [14] Л.А. Косяченко, И.М. Раренко, О.Ф. Склярчук, И.И. Герман, Sun Weigu. ФТП, **40**, 568 (2006).
- [15] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. ФТП, **48**, 232 (2014).
- [16] В.В. Брус, М.И. Илашук, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницкий, Б.Н. Грицюк. ФТП, **45**, 1109 (2011).
- [17] М.Н. Солован, П.Д. Марьянчук, В.В. Брус, О.А. Парфенюк. Неорг. матер., **48**, 1154 (2012).
- [18] V.V. Brus, M.I. Ilashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanytsky. Semicond. Sci. Technol., **26**, 125 006 (2011).
- [19] V.V. Brus. Semicond. Sci. Technol., **27**, 035 024 (2012).
- [20] V.V. Brus, M.I. Ilashchuk, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, O.A. Parfenyuk. Semicond. Sci. Technol., **28**, 025 013 (2013).
- [21] 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)].
- [22] V.V. Brus. Solar Energy, **86**, 786 (2012).
- [23] V.V. Brus. Solar Energy, **86**, 1600 (2012).
- [24] М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. ФТП, **48**, 1540 (2014).
- [25] А.И. Мостовой, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. ФТП, **47**, 788 (2013).
- [26] А.И. Мостовой, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. ФТП, **48**, 1205 (2014).
- [27] R. Yatskiv, J. Grym, V.V. Brus, O. Cernohorsky, P.D. Maryanchuk, C. Bazioti, G.P. Dimitrakopoulos, Ph. Komninou. Semicond. Sci. Technol., **29**, 045 017 (2014).

Редактор А.Н. Смирнов

## Electric and photoelectric properties of $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ heterostructure

*M.N. Solovan*<sup>\*+</sup>, *A.I. Mostovyi*<sup>\*</sup>, *V.V. Brus*<sup>\*•</sup>,  
*E.V. Mastruk*<sup>\*</sup>, *P.D. Maryanchuk*<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
58012 Chernivtsi, Ukraine

<sup>+</sup> Politecnico di Torino,  
10129 Torino, Italia

<sup>•</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien  
und Energie GmbH,  
12489 Berlin, Germany

**Abstract** Heterojunctions  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  were obtained by the deposition of titan nitride (TiN) thin film with  $n$ -type of conductivity onto prepared  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  substrates with  $p$ -type of conductivity by means of reactive magnetron sputtering. Their electrical and photoelectrical properties were investigated as well as the dominating current transport mechanisms were analyzed in the scope of the tunnel-recombination and tunnel models. The obtained structures  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  possessed the following photoelectrical parameters under  $80\text{ mW/cm}^{-2}$  illumination: the open-circuit voltage  $V_{OC} = 0.52\text{ V}$ , the short circuit current  $I_{SC} = 0.265\text{ mA/cm}^{-2}$  and the fill factor  $FF = 0.39$ .