

07

## Электрические свойства анизотипных гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$

© М.Н. Солован, Э.В. Майструк, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук

Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича, Украина  
E-mail: m.solovan@chnu.edu.ua

Поступило в Редакцию 3 октября 2013 г.

Впервые 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. Установлено, что гетероструктуры генерируют напряжение холостого хода  $V_{oc} = 0.52\text{ V}$ , ток короткого замыкания  $I_{sc} = 0.265\text{ mA/cm}^2$  и коэффициент заполнения  $FF = 0.39$  при освещении  $80\text{ mW/cm}^2$ .

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 [2,3]. Согласно работам [3–5], 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 впервые 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.

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, хорошая химическая инертность и стойкость к коррозии [6].

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.

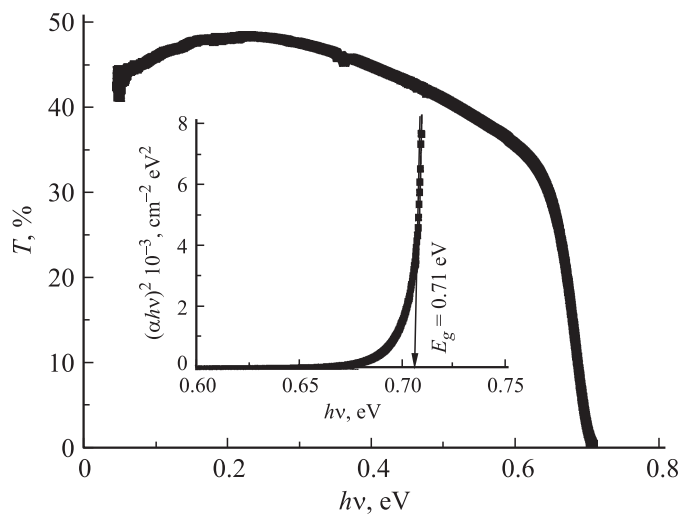
В данной работе исследуются электрические свойства гетероструктур, сформированных путем нанесения тонкопленочного TiN  $n$ -типа проводимости на монокристаллические подложки  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$   $p$ -типа проводимости, методом реактивного магнетронного распыления.

Для изготовления гетероструктур 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 благодаря подбору технологических параметров роста монокристаллов.

Коэффициент поглощения  $\alpha(\lambda)$  может быть определен из независимых измерений коэффициентов отражения и пропускания. На рис. 1 представлена кривая оптического пропускания монокристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  в широком диапазоне длин волн  $\lambda$ . Коэффициент отражения  $R$ , измеренный для  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  в исследованном интервале длин волн, практически не меняется с изменением длины волны и составляет  $R \approx 27\%$ .

В общем случае коэффициент поглощения  $\alpha$  связан с  $T$  и толщиной образца  $d$  выражением [7]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[ \frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2} \right]. \quad (1)$$

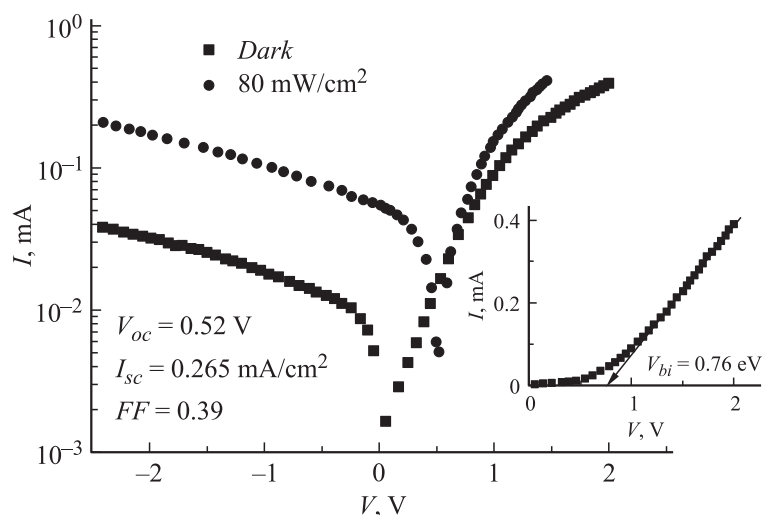


**Рис. 1.** Спектры пропускания монокристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . На вставке приведен график зависимости  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  для  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ .

Рассчитанная по формуле (1) зависимость  $\alpha$  от энергии фотонов  $h\nu$  представлена на вставке к рис. 1. Результаты представлены в координатах  $(\alpha h\nu)^2$  от  $h\nu$  (для прямозонного полупроводника, каковым является  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  [5]). В области края собственного поглощения зависимость  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  будет иметь прямолинейный участок, экстраполяцией которого до пересечения с осью абсцисс в точке  $h\nu = E_g$  можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника. Из рисунка следует, что для  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  величина  $E_g = 0.71$  eV, что согласуется с имеющимися литературными данными [8].

Нанесение пленок TiN проводилось на полированную поверхность монокристаллического  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  (типоразмером  $5 \times 5 \times 0.6$  mm) в универсальной вакуумной установке Leybold-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 однородно-



**Рис. 2.** Темновая и световая ВАХ гетероперехода  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  в полупологарифмическом масштабе. На вставке приведена прямая ветвь ВАХ гетероперехода.

сти пленок по толщине. Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-3}$  Па.

Для удаления неконтролированного 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 W. Процесс напыления длился 15 min при температуре подложек 573 K.

Фронтальный электрический контакт к тонкой пленке TiN формировался методом термического напыления индия. Омический контакт к подложке создавался сплавлением индия.

На рис. 2 представлены темновая и световая вольт-амперные характеристики гетероструктуры  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ .

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

Высота потенциального барьера  $\varphi_k$  гетероперехода определена путем экстраполяции линейного участка ВАХ до пересечения с осью напряжений (вставка рис. 2). Стоит отметить, что определенная высота потенциального барьера гетероперехода  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  при комнатной температуре ( $\varphi_k = eV_{bi} = 0.76 \text{ eV}$ , где  $V_{bi}$  — встроенный потенциал) значительно превышает аналогичный параметр для гетеропереходов с использованием собственного полупроводника  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  или  $n$ -типа проводимости ( $\varphi_k = 0.3\text{--}0.4 \text{ eV}$ ) [8,9]. Большее значение высоты потенциального барьера гетероперехода  $n\text{-TiN}/p\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  обусловлено разным типом проводимости материала окна и базы, а также электрическим диполем на гетерогранице.

Малое значение  $I_{sc}$  может быть связано с рекомбинацией через глубокие поверхностные состояния на гетерогранице и большим последовательным сопротивлением  $R_s = 3.1 \text{ k}\Omega$  [10–12]. Возможными путями устранения этих негативных факторов являются модификация поверхности подложки  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ , использование дополнительного промежуточного слоя и дальнейшая оптимизация технологических режимов напыления тонких пленок TiN с целью формирования качественных гетеропереходов TiN/ $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . В результате такой оптимизации выходных фотоэлектрических параметров данной гетероструктуры она может быть успешно использована для изготовления радиационно-стойких фотоэлектрических полупроводниковых приборов для работы в широком спектральном диапазоне. Особый интерес представляет использование таких гетероструктурных фотодиодов в кварцевых оптоволоконных системах при длине волны  $1.55 \mu\text{m}$ .

В заключение стоит отметить, что достигнутая дырочная проводимость дефектных полупроводников  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  путем подбора технологических параметров существенно расширяет возможности его практического применения для изготовления радиационно-стойких фотоэлектрических полупроводниковых приборов для работы в широком спектральном диапазоне. Особый интерес представляет использование таких гетероструктурных фотодиодов в кварцевых оптоволоконных системах при длине волны  $1.55 \mu\text{m}$ .

**Список литературы**

- [1] *Лебедев А.А., Иванов А.М., Строкан Н.Б.* // ФТП. 2004. Т. 38. С. 129.
- [2] *Алфёров Ж.И.* // ФТП. 1998. Т. 32. С. 3.
- [3] *Грушка О.Г., Маслюк В.Т., Чупыра С.М., Мыслюк О.М., Биличук С.В., Заболоцкий И.И.* // ФТП. 2012. Т. 46. С. 327.
- [4] *Бакуменко В.Л., Бонаков А.К., Грушка Г.Г.* // Электрон. техн. Материалы. 1983. Т. 2. С. 75.
- [5] *Грушка О.Г., Горлей П.Н.* // Перспективные материалы. 2003. № 6. С. 33.
- [6] *Солован М.Н., Брус В.В., Марьянчук П.Д., Ковалюк Т.Т., Rappich J., Gluba M.* // ФТТ. 2013. Т. 55. С. 2123.
- [7] *Ковалюк Т.Т., Майструк Э.В., Марьянчук П.Д.* // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. С. 468.
- [8] *Косяченко Л.А., Паранчич Ю.С., Макогоненко В.Н., Склярчук В.М., Склярчук Е.Ф., Герман И.И.* // ЖТФ. Т. 73. С. 126.
- [9] *Косяченко Л.А., Раренко И.М., Склярчук О.Ф., Герман И.И., Sun Weiguo* // ФТП. 2006. Т. 40. С. 568.
- [10] *Brus V.V.* // Solar Energy. 2012. V. 86. P. 786.
- [11] *Brus V.V.* // Solar Energy. 2012. V. 86. P. 1600.
- [12] *Солован М.Н., Брус В.В., Марьянчук П.Д.* // ФТП. 2013. Т. 47. С. 1185.