

К. т. н. А. И. ТКАЧУК, к. т. н. О. Н. ЦАРЕНКО,  
к. т. н. С. И. РЯБЕЦ, к. ф.-м. н. И. Ю. ТКАЧУК, Ю. Г. КОВАЛЁВ

Украина, Кировоградский гос. педагогический ун-т  
им. Владимира Винниченко  
E-mail: atkachuk@kspu.kr.ua

Дата поступления в редакцию  
19.10 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $A^4B^6$

*Предложена лабораторная технология формирования поверхностно-барьерных диодов на основе эпитаксиальных гетероструктур  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ .*

При изготовлении инфракрасных детекторов эпитаксиальные гетероструктуры на основе четырехкомпонентных твердых растворов  $A^4B^6$ , полученные методом жидкофазной эпитаксии, остаются одними из самых перспективных и недорогих компонентов диодов Шоттки с полупрозрачными металлическими электродами, в которых излучение падает на переход со стороны барьерного контакта [1].

Цель данной работы — разработка лабораторной технологии формирования поверхностно-барьерных структур на основе эпитаксиальных слоев  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ , выращенных на полупроводниковых подложках  $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ .

Для получения поверхностно-барьерных структур использовались четырехкомпонентные твердые растворы  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$  ( $0,09 \leq x \leq 0,18$  (ат. д.) и  $0,02 \leq y \leq 0,06$  (ат. д.)), которые были выращены методом жидкофазной эпитаксии в потоке очищенного водорода из ограниченного объема пересыщенного раствора-расплава  $(Pb_{1-v}Sn_v)_{1-w}(Te_{1-u}Se_u)_w$  ( $0,163 \leq v \leq 0,371$  (ат. д.),  $0,011 \leq u \leq 0,046$  (ат. д.),  $0,01 \leq w \leq 0,05$  (ат. д.)) с использованием вертикального реактора (рис. 1) [1, 2].

В качестве полупроводниковых подложек использовали монокристаллические пластины  $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ , которые были получены путем разрезания выращенных методом Чохральского объемных монокристаллов в направлении (100). Подложки имели форму шайбы диаметром 20—30 мм и толщиной 1—2 мм при плотности поверхностных дислокаций  $N_d = (1 \dots 8) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$  и концентрации дырок  $P = (5 \dots 8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Разориентация подложек составляла не больше  $0,4^\circ$  относительно кристаллографической плоскости (100). Температура ликвидуса была 773—873 К при скорости программируемого охлаждения 0,1—0,2 К/мин и диапазоне снижения температуры 5—15 К.

Выращенные эпитаксиальные слои  $p$ - $Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}$  имели толщину 5—7 мкм, плотность поверхностных дислокаций  $N_d = (3 \dots 7) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ , концентрацию носителей заряда  $P = (4,6 \dots 4,9) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

и холловскую подвижность  $\mu_H = (3,7 \dots 4,1) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  при  $\approx 80 \text{ К}$ .

Поверхностно-барьерные структуры получали путем термического вакуумного напыления с использованием системы масок из нержавеющей стали [1, 3]. Перед формированием омического контакта эпитаксиальные гетероструктуры  $p$ - $Pb_{0,87}Sn_{0,13}Te_{0,96}Se_{0,04}/p^+$ - $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$  подвергали со

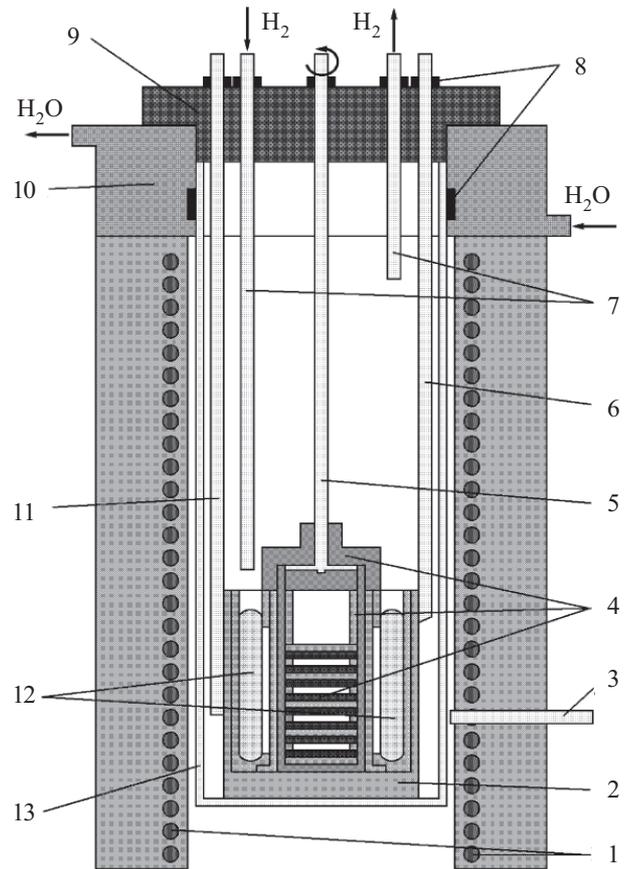


Рис. 1. Схема реактора для жидкофазной эпитаксии: 1 — нагревающий элемент; 2 — графитовый тигель для раствора-расплава; 3 — вход регулирующей термопары; 4 — графитовая поворотная cassette с подложками; 5 — кварцевый шток подвески cassette; 6 — кварцевый шток для передачи вибрации тиглю; 7 — кварцевые трубки газоснабжения; 8 — резиновые уплотнители; 9 — герметизирующая фторопластовая головка реактора; 10 — водоохлаждаемая насадка реактора; 11 — кварцевая трубка для ввода контрольной термопары; 12 — раствор-расплав; 13 — кварцевый реактор

стороны подложки механическому шлифованию с последующим химико-динамическим полированием при комнатной температуре в растворе 95% HBr+5% Br<sub>2</sub> до толщины подложки ≈200 мкм. Затем при температуре подложки T<sub>под</sub> ≈423...473 К на всю ее поверхность при остаточном давлении 10<sup>-5</sup> мм рт. ст. напыляли последовательно слои золота (толщиной d<sub>Au</sub> ≈150 нм), хрома (d<sub>Cr</sub> ≈100 нм) и меди (d<sub>Cu</sub> ≈250 нм) (рис. 2).

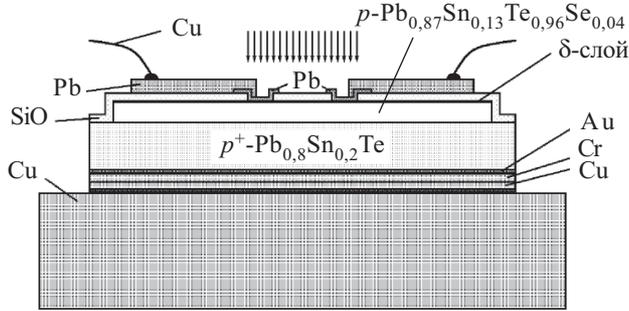


Рис. 2. Схематическое изображение фотоприемника на основе фотовольтаического инфракрасного сенсора Pb/δ-слой/p-Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te<sub>1-y</sub>Se<sub>y</sub>/p<sup>+</sup>-Pb<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te/Au/Cr/Cu

Для формирования защитного промежуточного слоя собственного окисла (δ-слоя) толщиной 10 нм свободную поверхность эпитаксиального слоя подвергали термическому окислению при T<sub>под</sub> ≈473 К в течение 2 мин с последующим (при T<sub>под</sub> ≈523 К) напылением поверх него изоляционного слоя окисла SiO толщиной 500 нм, в котором оставляли окна 0,5×0,5 мм. В эти окна напыляли полупрозрачные барьерные электроды из свинца толщиной 30 нм при T<sub>под</sub> ≈300 К. Затем на часть каждого сформированного электрода поверх изоляционного слоя SiO наносились полоски свинца толщиной 1000 нм в качестве контактных площадок. После этого всю структуру крепили со стороны медного слоя к медному теплоотводу с помощью припоя состава 52% In+47% Sn+1% Ag, а также монтировали медные токопроводящие проволочки диаметром 1 мм к контактными площадкам за пределами барьерных электродов.

Измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводили при постоянном токе и температуре ≈170 К. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследовали мостовым методом при частоте 1 МГц. Удельную обнаружительную способность поверхностно-барьерных структур измеряли на установке К-54.410 при температуре нагрева абсолютно черного тела 500 К. Модуляция излучения осуществлялась механическим прерывателем с частотой 800 Гц.

Полученные таким образом поверхностно-барьерные диоды Pb/δ-слой/p-Pb<sub>0,87</sub>Sn<sub>0,13</sub>Te<sub>0,96</sub>Se<sub>0,04</sub>/p<sup>+</sup>-Pb<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te/Au/Cr/Cu имели ВАХ (рис. 3), прямые ветви которых в области напряжений смещения 0,02<U<0,4 В хорошо аппроксимировались зависимостью

$$I = I_s \cdot \exp \left[ \frac{q(U - Ir)}{\beta kT} \right], \quad (1)$$

где I<sub>s</sub> — ток насыщения, I<sub>s</sub>=101...229 мкА;

q — элементарный заряд;

r — последовательное сопротивление, обусловленное суммой сопротивлений квазинейтральной области эпитаксиального слоя, сопротивления растекания подложки и сопротивления омического контакта, r=3,5...6,7 Ом;

β — коэффициент идеальности, β=1,7...2,8;

k — постоянная Больцмана;

T — температура измерений.

Обратные ветви ВАХ насыщения не отражали.

Произведение дифференциального сопротивления при нулевом смещении на активную площадь составляло R<sub>0A</sub>=0,39...0,92 Ом·см<sup>2</sup>.

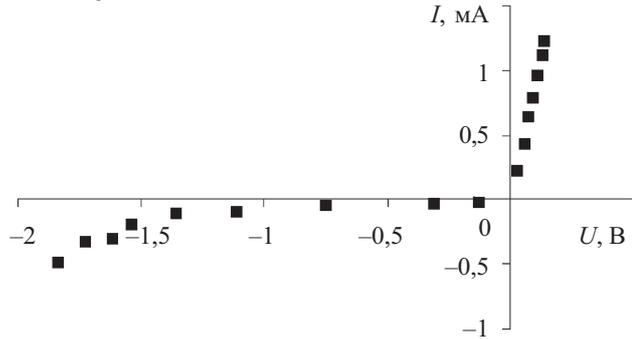


Рис. 3. ВАХ поверхностно-барьерной структуры Pb/δ-слой/p-Pb<sub>0,87</sub>Sn<sub>0,13</sub>Te<sub>0,96</sub>Se<sub>0,04</sub>/p<sup>+</sup>-Pb<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te/Au/Cr/Cu

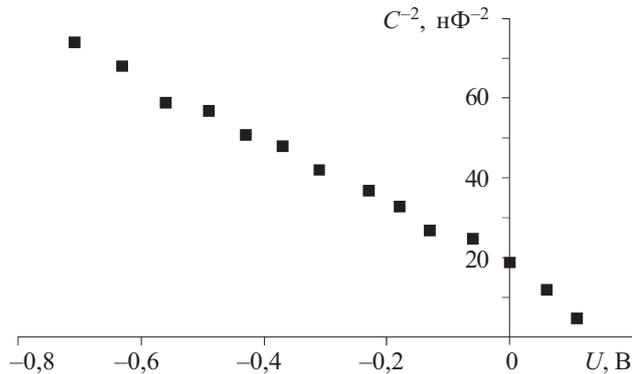


Рис. 4. ВФХ поверхностно-барьерной структуры Pb/δ-слой/p-Pb<sub>0,87</sub>Sn<sub>0,13</sub>Te<sub>0,96</sub>Se<sub>0,04</sub>/p<sup>+</sup>-Pb<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te/Au/Cr/Cu

ВФХ в области напряжений -0,08<U<0 В (рис. 4) хорошо аппроксимировались зависимостью

$$C^{-2} = \frac{2\beta}{A^2 q N_A \epsilon_0 \epsilon_s} \left[ \beta \left( \Phi_{bi}^0 - \frac{kT}{q} \right) - U \right], \quad (2)$$

где A — активная площадь барьерного контакта;

N<sub>A</sub> — концентрация заряженных центров;

ε<sub>s</sub> — относительная статическая диэлектрическая проницаемость эпитаксиального слоя.

Диффузионный потенциал при нулевом смещении Φ<sub>bi</sub><sup>0</sup>=0,106...0,114 В находили по формуле

$$\Phi_{bi}^0 = \frac{U_i}{\beta} + \frac{kT}{q}, \quad (3)$$

где напряжение отсечки U<sub>i</sub> определяли путем экстраполяции линейного участка ВФХ до пересечения с осью абсцисс. Емкость при нулевом смещении составляла C<sub>0</sub>=221...270 пФ.

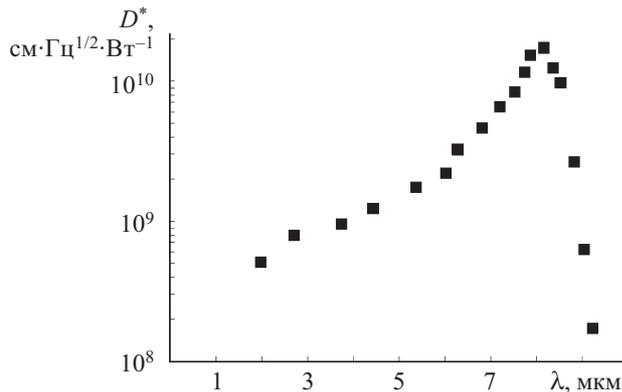


Рис. 5. Спектральная зависимость удельной обнаружительной способности поверхностно-барьерной структуры Pb/ $\delta$ -слой/ $p$ -Pb<sub>0,87</sub>Sn<sub>0,13</sub>Te<sub>0,96</sub>Se<sub>0,04</sub>/ $p^+$ -Pb<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te/Au

При температуре измерений  $T \approx 170$  К, температуре фона  $T_{\text{ф}} \approx 300$  К, пиковой длине волны  $\lambda_{\text{п}} \approx 8,2$  мкм и длине волны отсечки  $\lambda_{\text{от}} \approx 8,5$  мкм удельная обнаружительная способность составляла  $D_{\lambda}^* = (0,76 \dots 1,68) \cdot 10^{10}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> (рис. 5) при пиковой квантовой эффективности  $\eta_{\lambda} = 0,33 \dots 0,42$ .

Таким образом, проведенные исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств полупроводящих поверхностно-барьерных структур Pb/ $\delta$ -слой/ $p$ -Pb<sub>0,87</sub>Sn<sub>0,13</sub>Te<sub>0,96</sub>Se<sub>0,04</sub>/ $p^+$ -Pb<sub>0,8</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te/Au показали, что предложенная технология дает возможность получать фотовольтаические сенсоры, имеющие при пиковой длине волны и температуре 170 К значения удельной обнаружительной способности, близкие к ограниченному фоновыми шумами пределу детектирования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ткачук А. И. Рідинна епітаксія твердих розчинів сполук A<sup>4</sup>B<sup>6</sup> для діодів Шоттки / Дис. ... канд. техн. наук.— Херсон, ХДТУ, 2003.
2. Tsarenko O. N., Raybets S. I., Tkachuk A. I. Properties of the Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te<sub>1-y</sub>Se<sub>y</sub> epitaxial layers grown from the supersaturated melt-solution on dielectric and semiconductor substrates // Functional Materials.— 2005.— Vol. 12, N 3.— P. 526—530.
3. Царенко О. М., Рябець С. І., Ткачук А. І. Багатоелементні інфрачервоні фотоприймачі на основі епітаксійних гетероструктур  $p$ -Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te<sub>1-y</sub>Se<sub>y</sub>/ $p^+$ -Pb<sub>0,80</sub>Sn<sub>0,20</sub>Te // Вісник НУ "Львівська політехніка". Електроніка.— 2004.— № 513.— С. 89—95.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

МГТУ им. Н. Э. Баумана  
и ОАО Центральный научно-исследовательский технологический институт "ТЕХНОМАШ"  
организуют и проводят в сентябре 2007 года на базе Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана



XIII Международную научно-техническую конференцию  
**"ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ"**  
(МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОФОТОНИКИ)

Справки по e-mail:  
belyanin@tehnomash.ru  
samoylovich@tehnomash.ru  
Белянин Алексей Федорович  
Самойлович Михаил Исаакович

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год. Сборник под редакцией д. т. н., профессора П. П. Мальцева.— М.: Техносфера, 2006.— 120 с.**

Приведены мировые новости за 2005 год, сгруппированные по разделам и охватывающие наноматериалы, нанoeлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В книге приведены примеры реализации и применения с цветными иллюстрациями в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологии, наноматериалов, нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.