

УДК 621.383.49 : 621.315.59

В. Н. Овсяк, А. О. Сусяков, Т. И. Захарьяш,  
В. В. Васильев, С. А. Студеникин, Ю. Г. Сидоров,  
С. А. Дворецкий, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов

(Новосибирск)

### ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК CdHgTe, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

Для изготовления фотосопротивлений использованы гетероструктуры CdHgTe—CdZnTe—GaAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Состав и толщина эпитаксиальных слоев CdHgTe (КРТ) контролируются в процессе роста с помощью встроенного эллипсометра. Для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации фотовозбужденных носителей слои КРТ ограничиваются на границе с подложкой и на поверхности широкозонными областями, плавно переходящими к рабочему составу в объеме слоя. Фотосопротивления, чувствительные к длинноволновой области (более 13 мкм при  $T = 77$  К), изготовлены на слоях КРТ  $n$ -типа. Величина обнаружительной способности в области максимальной чувствительности находится в интервале  $(1,5-5) \times 10^{10}$  см · Гц<sup>1/2</sup> · Вт<sup>-1</sup>. Фотосопротивления, изготовленные на слоях КРТ  $p$ -типа (диапазон 5—6 мкм), имеют значения обнаружительной способности  $\sim (2-4)10^9$  см · Гц<sup>1/2</sup> · Вт<sup>-1</sup> при температурах, близких к комнатной.

**Введение.** Твердые растворы кадмий—ртуть—теллур (КРТ) являются наиболее используемым материалом для создания ИК-фотоприемников в диапазонах длин волн 3—5 и 8—12 мкм. Для регистрации слабых сигналов ИК-излучения в основном используются одиночные фотодиодные детекторы, а также линейки и матрицы. Однако существуют области применения ИК-детекторов такие, как более длинные волны, более высокие рабочие температуры, большие размеры, для которых работа фотодиода ограничена высокими значениями темнового тока. Для данных областей применения с успехом используют фотосопротивления. Если учесть простоту технологии изготовления фотосопротивлений, то использование таких детекторов с успехом возможно и в областях применения фотодиодов.

Работа фотосопротивления проста и заключается в увеличении проводимости  $G$  при освещении. Если через образец пропускается постоянный ток  $I$ , то изменение напряжения на образце  $U_s$  при освещении определяется выражением

$$U_s = U_b(\Delta G/G) \sim N_{\text{фот}}\tau, \quad (1)$$

где  $U_b$  — напряжение на образце;  $N_{\text{фот}}$  — количество поглощенных фотонов;  $\tau$  — время жизни.

Для генерационно-рекомбинационного шума спектральная плотность флуктуации носителей

$$S_N = 4g(N)\tau^2 = 4\overline{\Delta N^2}\tau. \quad (2)$$

Здесь  $g(N)$  — скорость генерации носителей в образце;  $\overline{\Delta N^2}$  — средний квадрат флуктуаций полного числа носителей. Из (1) и (2) получаем для обнаружи-

тельной способности  $D^*$  в области преобладания генерационно-рекомбинационного шума

$$D^* = \frac{\eta \lambda}{2hc} \left( \frac{\tau}{\overline{\Delta n^2} d} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\eta$  — квантовый выход;  $d$  — толщина образца;  $\overline{\Delta n^2}$  — средний квадрат флуктуаций концентрации носителей.

В достаточно чистых образцах

$$\overline{\Delta n^2} = \frac{np}{n+p} \quad (4)$$

и

$$D^* = \frac{\eta \lambda}{2hc} \left( \frac{n+p}{np} \frac{\tau}{d} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

для  $n \gg p$

$$D^* = \frac{\eta \lambda}{2hc} \left( \frac{\tau}{pd} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Обычно доминирующей является оже-рекомбинация и  $\tau \sim n^{-2} n_i$ :

$$D^* \sim \left( \frac{1}{hd} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Таким образом, для достижения высоких значений обнаружительной способности необходимо иметь низкую темновую концентрацию и большое время жизни; толщина образца должна иметь минимально возможное значение, однако достаточное для поглощения большей части падающего света. Обычно близка к оптимальной  $d \approx 1/\alpha$  ( $\alpha$  — коэффициент поглощения света). Для КРТ это дает  $d < 10$  мкм. При таких толщинах фотоспротивлений эффективное время жизни в значительной степени зависит от состояния поверхности. При больших скоростях поверхностной рекомбинации время жизни существенно снижается, что приводит к ухудшению характеристик приборов даже при высоком качестве материала. Обычно для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации проводят пассивацию поверхности. При изготовлении фотоспротивлений на основе КРТ для пассивации поверхности наносят покрытия из CdS, ZnS, SiO<sub>2</sub> и др. Предлагалось проводить пассивацию поверхности пленок КРТ выращиванием тонкого слоя CdTe в едином процессе в методе молекулярно-лучевой эпитаксии [1]. Из полученных структур были изготовлены фотоспротивления, обладающие относительно высокими характеристиками, без дополнительной пассивации. Это свидетельствует о пассивирующем воздействии пленки CdTe на поверхность КРТ.

Нами разработана технология выращивания высококачественных пленок КРТ методом МЛЭ с непрерывным контролем состава пленки по толщине в процессе роста [2]. Данная технология позволяет реализовать пассивацию поверхностей раздела формированием слоев переменного состава с более широкозонным материалом на границе раздела пленка — подложка и на поверхности пленки [3]. Такие слои создают электрические поля, препятствующие движению носителей из объема пленки к границам раздела, что приводит к уменьшению влияния поверхностной рекомбинации.

Данная работа посвящена исследованию характеристик фотоспротивлений при температуре жидкого азота и комнатной температуре, изготовленных на основе гетероструктур на подложках из арсенида галлия методом МЛЭ с варизонными слоями на границах пленки для пассивации.

**Выращивание пленок КРТ.** Рост пленок КРТ осуществлялся на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-В», оборудованной для выращи-

вания ртутьсодержащих соединений. Для контроля состава пленок в процессе роста применялся автоматический эллипсомер. В качестве подложек использовался GaAs с ориентацией (130). Данная ориентация позволяет выращивать пленки КРТ различных составов в более широком диапазоне давлений ртути без ухудшения кристаллического совершенства. Плотность V-дефектов на поверхности составляет  $10^2 \text{ см}^{-2}$ . Для изготовления фотосопротивлений были выращены гетероструктуры CdHgTe—CdZnTe—GaAs с широкозонными слоями у границы раздела пленка — подложка и поверхности пленки. Рост пленки КРТ начинался с состава  $X_{\text{CdTe}} = 0,3$  и изменялся до требуемого состава активной области на толщине до 2 мкм. Состав активной области пленки КРТ толщиной  $\sim 5$  мкм для разных гетероструктур лежал в пределах  $X_{\text{CdTe}} = 0,185—0,205$ . На поверхности активной области выращивался слой КРТ переменного состава толщиной до 1 мкм с увеличением состава до  $X_{\text{CdTe}} = 0,3$  на поверхности гетероструктуры.

Состав пленок измерялся также по ИК-спектрам пропускания при комнатной температуре в диапазоне длин волн 2—20 мкм с помощью фурье-спектрометра "Bruker IFS-113V", снабженного ИК-микроскопом. Проведено сравнение данных ИК-спектроскопии, эллипсометрии в процессе роста пленок КРТ и спектров фотоотклика изготовленных фотосопротивлений. Получено хорошее соответствие данных этих методик в определении состава и ширины запрещенной зоны выращенных пленок КРТ.

**Изготовление фотосопротивлений и измерение их характеристик.** Для изготовления охлаждаемых (до  $T = 77 \text{ К}$ ) фотосопротивлений, чувствительных в длинноволновой области ИК-спектра, использовались пленки *n*-типа без дополнительных отжигов после роста. Состав пленок изменялся в диапазоне  $x = 0,185—0,205$ . Концентрация электронов составляла  $(1—4)10^{14} \text{ см}^{-3}$ , холловская подвижность  $70000—120000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , время жизни неравновесных носителей  $150—500 \text{ нс}$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Фотосопротивления, работающие при комнатных и близких к комнатным температурах, изготавливались из пленок *p*-типа проводимости, полученных при термическом отжиге. Состав пленок в активной области  $X_{\text{CdTe}} = 0,23—0,25$ . Концентрация дырок, подвижность и время жизни  $(1—5)10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $30—80 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $70—250 \text{ нс}$  соответственно при комнатной температуре.

Фотосопротивления представляли собой мезаструктуры размером  $1 \times 3 \text{ мм}$  с активной площадкой  $1 \times 1 \text{ мм}$  и контактными площадками  $1 \times 1 \text{ мм}$ . Мезаструктуры изготавливались по стандартной технологии с использованием низкотемпературной фотолитографии ( $T < 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ). На контактных площадках перед нанесением металла с поверхности пленки удалялся слой толщиной порядка 1,5 мкм и затем вакуумным термоиспарением наносился слой индия толщиной 2 мкм. Дополнительной пассивации поверхности мезаструктур не проводилось. Спектральные характеристики фотосопротивлений измерялись с помощью монохроматора ИКС-31. Для измерения шумовых характеристик использовались селективные нановольтметры типа "Unipan" с предусилителем и микровольтметр ВЗ-57.

На рис. 1 приведены спектральные характеристики фотосопротивлений, изготовленных на пленках с различными составами при температурах жидкого азота и комнатной. Изменение длинноволновой границы fotocувствительности с температурой находится в хорошем согласии с зависимостью ширины запрещенной зоны от температуры и состава [4]:

$$E_g = -0,295 + 1,87x - 0,28x^2 + (6 - 14x + 3x^2)10^{-4}T + 0,35x^4. \quad (8)$$

На рис. 2 приведены зависимости вольт-ваттной чувствительности  $S_v$ , напряжения шума  $U_n$  (в области белого шума) и обнаружительной способности  $D^*$  от величины напряжения смещения на фоторезисторе  $U_b$  для образца GET-2. В области преобладания генерационно-рекомбинационного шума  $D^*$  слабо зависит от смещения в широком диапазоне  $U_b$ .

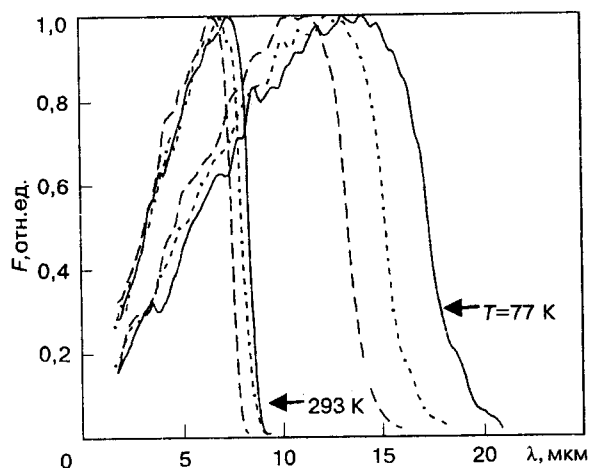


Рис. 1. Спектральные зависимости фотоотклика  $F$  фотоспротивлений с различным составом пленок КРТ при температурах жидкого азота и комнатной:  
 а —  $X = 0,186$  (сплошная хривая); б —  $X = 0,192$  (штрихпунктирная); в —  $X = 0,199$  (штриховая) — образец GET-2

Вольт-ваттная чувствительность в максимуме  $D^*$  достигает величины 8500 В/Вт при напряжении смещения 0,8 В. Отклонение от линейности  $S_v$ , видимо, связано с неомичностью контактов.

На рис. 3 приведены частотные зависимости напряжения шума  $U_n$  при различных смещениях  $U_b$  для этого же фотоспротивления. Спектральная плотность низкочастотного шума имеет вид  $S(f, v) = \text{const} U_b^\alpha / f^\beta$ , где  $\alpha \cong 2$  и  $\beta \cong 1$ . Таким образом,  $1/f$ -шум имеет «классический» вид и его можно охарактеризовать величиной параметра Хуга [5]:

$$\alpha_H = R_v N f / V_b^2, \quad (9)$$

где  $N$  — полное число носителей;  $f$  — частота измерения. Расчет по (9) дает  $\alpha_H = 4 \cdot 10^{-3}$ . Для фотоспротивлений, изготовленных из пленок с различными составами ( $X = 0,185—0,205$ ), получены значения обнаружительной способности  $D^*(\lambda_{\text{max}}, 20 \text{ кГц}, 60^\circ) = (1,5—5)10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Лучшие значения  $D^*$  приближаются к обнаружительной способности, ограниченной

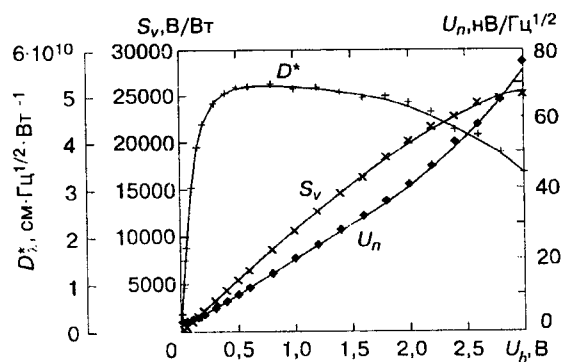


Рис. 2. Зависимости вольт-ваттной чувствительности  $S_v$ , напряжения шума  $U_n$  и обнаружительной способности  $D^*$  от напряжения смещения для образца GET-2 при  $T = 77 \text{ К}$  ( $\lambda = 12 \text{ мкм}$ ,  $f = 20 \text{ кГц}$ ,  $\text{FOV} = 60^\circ$ )

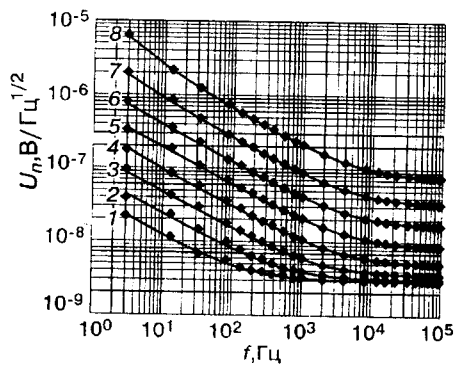


Рис. 3. Частотная зависимость напряжения шума для образца GET-2 при  $T = 77$  К ( $FOV = 60^\circ$ ,  $300$  К) при различных смещениях  $U_b$ :  
 1 – 25, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 200, 5 – 400, 6 – 800 мВ,  
 7 – 1,6, 8 – 3,0 В

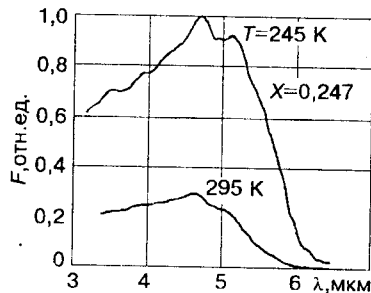


Рис. 4. Спектральные зависимости фотоотклика фотосопротивления GETR-10 для различных температур

фоном. Разброс параметра Хуга на этих фотосопротивлениях составляет величину  $\alpha_H = (0,5-8)10^{-3}$ . В основном значения  $\alpha_H$  близки к теоретическому значению  $4,6 \cdot 10^{-3}$  для шума «когерентного состояния» [6]. В образцах, для которых  $\alpha_H \leq 2 \cdot 10^{-3}$ , видимо, отсутствует механизм шума когерентного состояния и  $1/f$ -шум определяется механизмом межзонного переброса, для которого расчетные значения  $\alpha_H \cong (5-12)10^{-4}$  для  $x = 0,185-0,205$  при  $T = 80$  К [7].

Корреляции параметра Хуга с электрофизическими параметрами исходной структуры и составом не обнаружено. Мы связываем разброс параметра Хуга с различиями в контактных сопротивлениях, поскольку контакты изготавливаются осаждением индия в глубокие ямки, получаемые химическим травлением. Если это верно, то уменьшения  $1/f$ -шума можно достичь более тщательным изготовлением контактов (например, подлегированием подконтактных площадок, выращиванием HgTe на контактных областях и т. д.).

На рис. 4 приведены спектральные характеристики фотосопротивления GETR-10, изготовленного из пленок КРТ  $p$ -типа проводимости ( $p$ -тип материал получен термическим отжигом из материала  $n$ -типа), при температурах, близких к комнатной. На рис. 5 даны значения обнаружительной способности  $D^*(\lambda_{max})$  в зависимости от напряжения смещения для разных частот. Видно, что на высоких частотах (в области белого шума) значения  $D^*$  при оптимальных смещениях достигают величины  $1,9 \cdot 10^9$  см  $\cdot$  Гц $^{1/2} \cdot$  Вт $^{-1}$  при

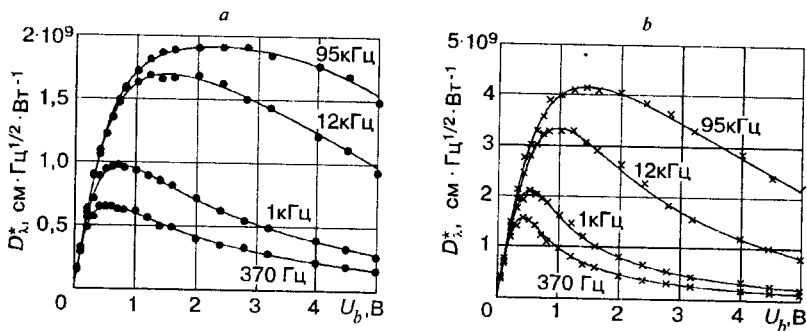


Рис. 5. Зависимость обнаружительной способности от напряжения смещения для фотосопротивления GETR-10 ( $\lambda = 4,7$  мкм):  
 а –  $T = 295$  К; б –  $245$  К,  $FOV = 40^\circ$

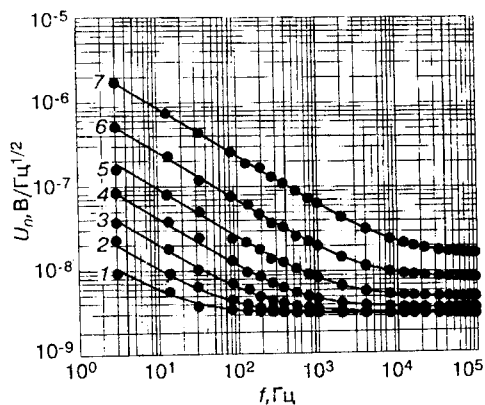


Рис. 6. Частотная зависимость напряжения шума для образца GETR-10 при различных смещениях  $U_b$ :  
 1 – 50, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 400, 5 – 800 мВ, 6 – 1,6, 7 – 3,2 В

комнатной температуре и  $4,1 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \Gamma\text{ц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  при температуре  $T = 245 \text{ К}$ . На рис. 6 приведены частотные зависимости напряжения шума при комнатной температуре от приложенного напряжения  $U_b$ . В области смещений до 1,2 В спектральная плотность  $1/f$ -шума имеет «классический» вид и параметр Хуга равен  $2 \cdot 10^{-3}$ .

#### ВЫВОДЫ

Выращены пленки КРТ методом МЛЭ на подложках GaAs с более широкозонными слоями у границы раздела пленка — подложка и поверхности для снижения влияния процессов поверхностной рекомбинации. Изготовлены фотосопротивления, обладающие высокой чувствительностью в области длин волн 8—16 мкм, работающие при температуре жидкого азота, и в области длин волн 3—6 мкм, работающие при температурах, близких к комнатной. Ограничения фоточувствительности определяются шумовыми характеристиками приборов, природа которых выясняется в настоящее время.

Авторы признательны А. Г. Милехину за проведение измерений ИК-спектров пропускания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuan S., He L., Yu J. et al. Infrared photoconductor fabricated with a molecular beam epitaxially grown CdTe/HgCdTe heterostructure // *Appl. Phys. Lett.* 1991. 58. P. 914.
2. Svitashov K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al. The growth of high-quality MCT films by MBE using in-situ ellipsometry // *Cryst. Res. Techn.* 1994. 29, N 7. P. 931.
3. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al. The controlled growth of high-quality mercury cadmium telluride // *Thin Solid Films.* 1995. 267. P. 121.
4. Chu J., Xu S., Tang D. Energy gap versus alloy composition and temperature in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  // *Appl. Phys. Lett.* 1983. 43. P. 1064.
5. Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. Experimental studies on  $1/f$  noise // *Rep. Progr. Phys.* 1981. 44, N 5. P. 479.
6. Handel P. H. Coherent state quantum  $1/f$  noise and the quantum  $1/f$  effect // *Noise in Physical Systems and  $1/f$  Noise* /Ed. A. d'Amico, P. Mazetti. N. Y.: Elsevier, 1986. P. 465.
7. Handel P. H., van der Ziel A. Relativistic correction of the Hooge parameter for Umklapp  $1/f$  noise // *Physica.* 1986. 141B+C. P. 145.

Поступила в редакцию 19 марта 1996 г.