

# Особенности спектров фотопроводимости эпитаксиальных варизонных гетеросистем CdTe/CdHgTe

© А.И. Власенко, З.К. Власенко<sup>†</sup>

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

(Получена 17 марта 2005 г. Принята к печати 20 апреля 2005 г.)

На основе исследований структурных и фотоэлектрических свойств варизонных гетеросистем CdTe/CdHgTe установлено, что металлургическая граница материалов, располагающаяся в толще структуры, обогащена структурными дефектами и характеризуется повышенным темпом рекомбинации. Это является причиной потери фоточувствительности в средневолновом инфракрасном диапазоне широкополосных спектров фотопроводимости таких гетеросистем. При малых толщинах эпитаксиального слоя ( $< 10\text{--}20$  мкм) влияние металлургической границы может проявляться в уменьшении или полной потере фоточувствительности.

PACS: 73.50.Pz, 73.50.Gr, 73.61.Ga

## 1. Введение

Для дистанционного мониторинга процессов и объектов с использованием отражательной и излучательной способности материала целесообразно применение широко- или многополосных фотоприемников. Это связано с тем, что отражательные свойства объектов исследуются в видимой и ближней инфракрасной (ИК) области спектра, а излучательные — в средней и дальней ИК области спектра [1,2].

Обычно этот вопрос решается конструированием „сэндвичей“ из слоев или пластин полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны  $E_g$ . Такие системы имеют ряд очевидных недостатков, в частности, большие оптические потери за счет отражения и рассеяния на границах раздела, существенные механические напряжения, ускоренную деградацию и др.

Этих недостатков в значительной степени лишены структуры с плавным градиентом состава, которые обеспечивают фоточувствительность в широком спектральном диапазоне [3], в частности, для области  $0.8\text{--}15$  мкм эпитаксиальные варизонные гетеросистемы на основе CdTe/CdHgTe (КТ/КРТ).

При их использовании, однако, возникает вопрос о влиянии на фотоэлектрические характеристики таких гетеросистем геометрической границы раздела исходных материалов — металлургической границы, которая в реальной ситуации, как показано, например, в [4,5], насыщена структурными дефектами различной физико-химической природы и может приводить к существенной потере фоточувствительности элементов или искажению их спектральных характеристик.

Возможно, именно влиянием металлургической границы обусловлены низкие по сравнению с объемными кристаллами электрические и фотоэлектрические параметры таких структур, что неоднократно отмечалось в литературе (см., например, [6]).

Роли металлургической границы в формировании спектральных характеристик фотопроводимости (ФП) эпитаксиальных варизонных гетеросистем КТ/КРТ и посвящена настоящая работа.

## 2. Получение и особенности структуры варизонных слоев CdHgTe

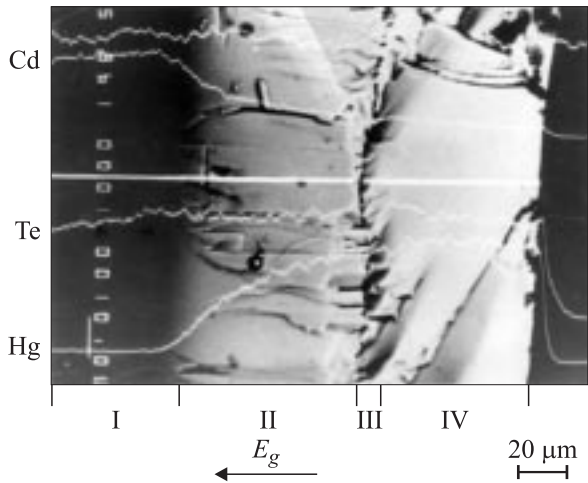
Эпитаксиальные слои переменного состава КРТ выращивались методом парофазной эпитаксии, аналогичным методу, описанному в [7,8]. В качестве подложек применялись ориентированные в плоскостях  $\{111\}$  или  $\{110\}$  пластины оптически прозрачного высокоомного  $p$ -CdTe с удельным сопротивлением не менее  $10^5$  Ом·см и плотностью дислокаций  $N_d < 10^5$  см<sup>-2</sup>. В качестве источника использовались кристаллы HgTe или CdHgTe. Состав твердого раствора на поверхности и профили распределения компонент по толщине слоя регулировались температурой, временем роста, давлением насыщенных паров Hg, Te.

Содержание компонент и их распределение по толщине определялись по данным электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа, структурное качество контролировалось методами оптической и электронной микроскопии сколов и поверхности слоев.

Типичная микрофотография обработанного в селективном травителе поперечного скола эпитаксиальной гетеросистемы КТ/КРТ и распределение по толщине Cd, Hg, Te приведены на рис. 1. Здесь слои: I — часть подложки с чистым CdTe, II — варизонная часть подложки, III — область металлургической границы, IV — варизонный эпитаксиальный слой.

Тип проводимости контролировался зондовым измерением термоэдс с использованием косого шлифа. Выращенные слои имели  $p$ -тип проводимости. Термоотжигом в парах ртути или охлаждением по специальной программе проводимость слоев при необходимости конвертировалась в  $n$ -тип.

<sup>†</sup> E-mail: zvlav@isp.kiev.ua



**Рис. 1.** Микрофотография поперечного скола эпитаксиальной структуры CdTe/CdHgTe с распределением по координате  $z$ , перпендикулярной слоям, элементов Cd, Hg, Te. Слои: I — часть подложки с чистым CdTe, II — диффузионная варизонная часть подложки, III — область металлургической границы, IV — варизонный эпитаксиальный слой. Направление увеличения  $E_g$  показано стрелкой.

Спектральные зависимости ФП измерялись в диапазоне длин волн  $\lambda = 2\text{--}15\text{ мкм}$  при освещении как со стороны широкозонной подложки, так и со стороны узкозонного слоя; металлические контакты наносились на торцевые поверхности.

В процессе парофазной эпитаксии в подложке КТ идет процесс твердофазного замещения атомов Cd атомами Hg, в нарастающей пленке КРТ происходит замещение атомов ртути атомами Cd. В результате формируется слой переменного состава (рис. 1). Процессы взаимной диффузии Cd и Hg в подложке и в наращиваемой пленке удовлетворительно описываются двумя квазиневазисимыми значениями коэффициента диффузии. Диффузия кадмия в диффузионном слое подложки (область II) характеризуется коэффициентом диффузии  $D_1 \approx 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ , что близко к величине коэффициента диффузии кадмия по вакансионному механизму при отжиге бинарного соединения CdTe в парах кадмия [9]. Это указывает на подобие процессов диффузии, несмотря на большое различие концентраций диффундирующих компонентов (от  $10^{16}$  до  $10^{23} \text{ см}^{-3}$ ). Диффузия кадмия в эпитаксиально-диффузионном слое (область IV) описывается значением коэффициента диффузии  $D_2 = 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ , на 2 порядка превышающим значение  $D_1$ . С учетом данных по  $D_1$  и  $D_2$  могут подбираться технологические режимы получения диффузионного и эпитаксиального слоев заданных толщин и градиентов состава, что существенно влияет на спектральные диапазоны фоточувствительности варизонных структур и вид их спектральных характеристик.

Несмотря на то что постоянные решеток ( $a$ ) и их температурные коэффициенты расширения ( $\alpha_T$ ) компо-

нентов этой гетерокомпозиции (CdTe и HgTe) близки (для CdTe  $a = 0.6481 \text{ нм}$ ,  $\alpha_T = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ; для HgTe  $a = 6461 \text{ нм}$ ,  $\alpha_T = 4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  [10, 11]), параметр несоответствия все же составляет  $f \approx 3 \cdot 10^{-3}$ , что более чем на порядок превышает этот параметр для условий гомоэпитаксии [12], и вследствие этого металлургическая граница обогащена структурными дефектами. В области металлургической границы наблюдается повышенная плотность дислокационных ямок травления:  $N_d \approx 10^6\text{--}10^7 \text{ см}^{-2}$ .

### 3. Спектры фотопроводимости варизонных гетеросистем CdTe/CdHgTe

Структуры для исследований фотоэлектрических характеристик получали после удаления высокоомной подложки (область I на рис. 1) и части диффузионного (область II) или эпитаксиального слоя (область IV) (соответственно с широкозонной или узкозонной стороны). В зависимости от условий эксперимента область металлургической границы (область III) либо оставалась в толще исследуемого образца, либо удалялась. При этом для получения структур с резким градиентом состава металлургическая граница удалялась вместе с эпитаксиальным слоем (область IV), для структур с малым градиентом состава — вместе с подложкой и диффузионным слоем (области I, II).

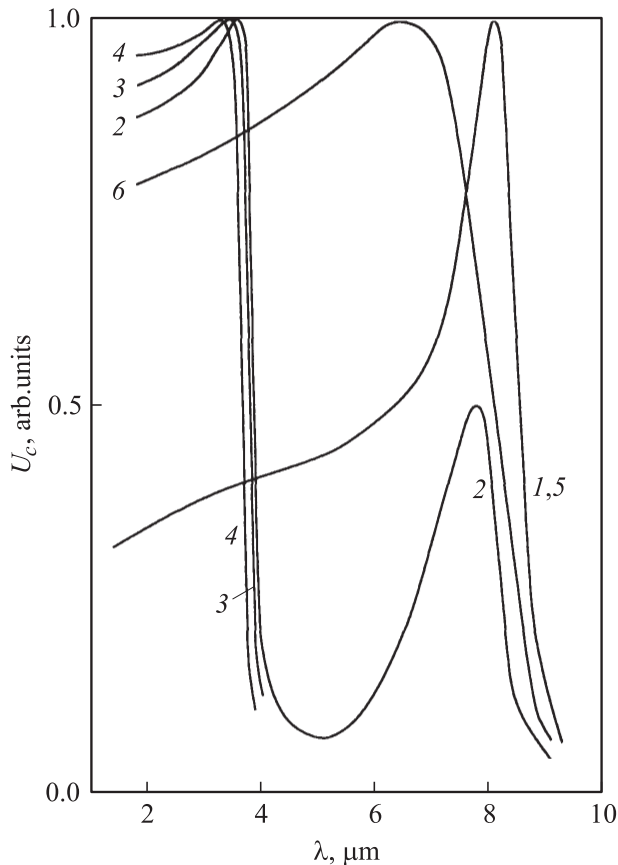
На рис. 2 приведены спектры ФП при температуре  $T = 77 \text{ К}$ : исходной эпитаксиальной гетеросистемы КТ/КРТ при освещении с узкозонной стороны эпитаксиального слоя (кривая 1) и со стороны широкозонной подложки (кривая 2); этой же структуры, содержащей только диффузионный слой КРТ (с удаленной эпитаксиальной частью) при освещении с узкозонной (кривая 3) и широкозонной (кривая 4) стороны; эпитаксиального слоя (с удаленными областями I—III) и прилегающего к металлургической границе эпитаксиального слоя IV при освещении с узкозонной (кривая 5) и широкозонной стороны (кривая 6). При анализе этих спектров ФП в варизонном полупроводнике необходимо учитывать следующие факторы:

- полоса фоточувствительности ограничивается в основном крайними по толщине пластины  $d$  значениями ширины запрещенной зоны  $E_g$  (максимальным  $E_{g \text{ max}} = E_{g0}$  при  $z = 0$  и минимальным  $E_{g \text{ min}} = E_{gd}$  при  $z = d$ );

- функция фотогенерации неравновесных носителей заряда (ННЗ)  $F(z)$  перемещается по координате  $z$  (перпендикулярно плоскости структуры) при изменении энергии фотонов в связи с зависимостью  $E_g(z)$ ;

- из-за дрейфа в квазиэлектрическом поле структуры функции генерации и рекомбинации пар ННЗ, как правило, пространственно разделены;

- квазиэлектрическое поле структуры стягивает ННЗ с широкозонной поверхности и прижимает их к уз-



**Рис. 2.** Спектральное распределение ФП эпитаксиальной структуры CdTe/CdHgTe: 1,2 — исходная структура; 3,4 — с удаленным эпитаксиальным слоем; 5,6 — с удаленными подложкой, областью металлургической границы и прилегающей к металлургической границе части эпитаксиального слоя. 1,3,5 — освещение со стороны эпитаксиального слоя; 2,4,6 — освещение со стороны подложки.

козонной поверхности, соответственно снижая рекомбинационную активность ширококозонной и увеличивая рекомбинационную активность узкокозонной поверхности; это приводит к увеличению фоточувствительности в коротковолновом диапазоне спектра и ее уменьшению в длинноволновом диапазоне спектра;

— в используемой методике измерения ФП (торцевые контакты) ее полное значение, являясь интегральной величиной, определяется глубиной модуляции светом проводимости слоев с различной фоточувствительностью; локальное значение фотосигнала  $U_c \propto \langle \mu(z)\tau(z) \rangle$ , форма спектра  $U_c(\lambda)$  в пределах полосы ФП задается координатными зависимостями подвижности ННЗ ( $\mu$ ) и их времени жизни ( $\tau$ );

— для фиксированного значения энергии фотона  $h\nu_i = E_{gi}(z)$  ширина фотопроводящего слоя  $\Delta z_i$  ограничена в основном суммой диффузионно-дрейфовых длин ННЗ вдоль квазиэлектрического поля варизонной структуры  $L^+$  и против этого поля  $L^-$  относительно максимума функции их генерации ( $\Delta z_i \approx L^+ + L^-$ );

— величины  $L^+$ ,  $L^-$  в структурах с координатной зависимостью величин  $\mu$ ,  $\tau$  имеют смысл эффективных (в условиях резкого градиента  $E_g$  их использование для количественных оценок требует дополнительного анализа);

— величина фототока через пластину толщиной  $d$  и с поперечным сечением  $S$  равна  $J = S \int_0^d j_i(z) dz$ , где  $j_i$  — плотность фототока в слое, перпендикулярном направлению распространения света.

При освещении исходной структуры с узкокозонной стороны (область IV на рис. 1) наблюдается  $\delta$ -образная форма спектров ФП (рис. 2, кривая 1), типичная для однородных диффузионно-толстых образцов с повышенной скоростью поверхностной рекомбинации  $s$ . Это подтверждают данные рентгеноспектрального анализа, свидетельствующие о сравнительно невысоком градиенте состава в эпитаксиальном слое структуры. При максимальном значении коэффициента поглощения в КРТ  $\alpha \approx 10^3 \text{ см}^{-1}$  [13] глубина проникновения света (без учета координатной зависимости  $E_g$ )  $1/\alpha \approx 10 \text{ мкм}$ , длина диффузии дырок  $L \approx 3-5 \text{ мкм}$ , т.е. проводимость при поверхностном возбуждении модулируется в слое толщиной не более 10–15 мкм (толщина эпитаксиального слоя  $\sim 70 \text{ мкм}$ ). Определенное по кратности спада фоточувствительности в коротковолновой области при  $\tau \approx 10^{-7} \text{ с}$  (из измерений по кинетике релаксации ФП) [14] значение скорости поверхностной рекомбинации составляет  $s \approx 6 \cdot 10^3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ .

При освещении этой структуры со стороны подложки спектральный диапазон фоточувствительности расширяется в коротковолновую область до 1.5–2 мкм (рис. 2, кривая 2) за счет „подключения“ слоев, обогащенных Cd, с большими значениями  $E_g$  (области I, II на рис. 1). „Провал“ сигнала по спектру между двумя максимумами (в диапазоне 4–6 мкм) естественно связать с уменьшением параметра  $\langle \mu\tau \rangle$  в слое  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.3-0.4$ . Основной причиной этого может быть структурно несовершенная область в глубине пластины, соответствующая металлургической границе между диффузионным и эпитаксиальным слоями [4,5] с низкими значениями  $\mu$ ,  $\tau$  (область III на рис. 1). По данным рентгеноспектрального анализа в исследованной структуре она располагается на глубине, соответствующей области составов с  $x \approx 0.3-0.4$  (в зависимости от параметров роста) (см. рис. 1), что коррелирует со спектрами ФП (при  $x = 0.3 E_g \approx 0.25 \text{ эВ}$ ). Влияние этого слоя распространяется на ННЗ по обе стороны металлургической границы: в эпитаксиальный слой на расстояние  $L^+$ , в подложку на расстояние  $L^-$ . Таким образом, при известном распределении состава твердого раствора по толщине пленки и диапазону „провала“ фоточувствительности на кривой спектрального распределения ФП с точностью до значений  $(L^+ + L^-)$  может быть найдена толщина дефектного слоя, присущего металлургической границе.

Следует отметить наблюдающееся, как правило, небольшое несоответствие спектрального положения длинноволнового максимума ФП состава материала на поверхности пленки, оцененного по данным рентгено-спектрального анализа (сдвиг в коротковолновую область). Это может быть связано с увеличением прозрачности образца для энергий квантов  $E_{g\min} \leq hv \leq E_{g\min} + (dE_g/dz)\alpha^{-1}$  в связи с уменьшением эффективной толщины поглощающего слоя, а также влиянием варизонного квазиэлектрического поля, стягивающего ННЗ к узкозонной поверхности пленки с глубины  $L^+$ , где они рекомбинируют с эффективным „поверхностным“ временем жизни, меньшим объемного,  $\tau_s < \tau_v$ , что соответственно приводит к уменьшению ФП в длинноволновом спектральном диапазоне.

После удаления эпитаксиального „квазиоднородного“ слоя (области III, IV на рис. 1) в структуре остается лишь диффузионный слой с большей  $E_{g\min}$  и большим градиентом состава ( $dE_g/dz \approx 100$  эВ/см). При его облучении с узкозонной стороны максимум ФП (по сравнению с исходным), как и следовало ожидать, смещается в коротковолновую область (в сторону больших  $x$ ) (рис. 2, кривая 3), длинноволновый спад соответствует расположению металлургической границы с низкой величиной  $\tau$  (практически совпадает с минимумом на кривой 2). Относительное возрастание фоточувствительности в коротковолновой области по сравнению с кривой 1 естественно связать не с уменьшением скорости поверхностной рекомбинации (поскольку обработка поверхностей в обоих случаях проводилась одинаково), а с уменьшением вклада в ФП ответственных за формирование максимума и длинноволнового края объемных генерационно-рекомбинационных процессов (см. выше) [14]. Действительно, встроенное квазиэлектрическое поле приводит к увеличению эффективной диффузионной длины до  $L^+$  и образец в рекомбинационном отношении становится диффузионно-тонким. В этом случае характер спектра ФП определяется в основном повышенным темпом рекомбинации на узкозонной поверхности пленки.

При освещении этой структуры с широкозонной стороны спектр ФП (рис. 2, кривая 4) практически совпадает с кривой 3 и коротковолновым участком кривой 2. Следует отметить также совпадение кривых 3 и 4 с коротковолновым максимумом кривой 2; это подтверждает, что последний формируется расположенным в подложке диффузионным варизонным слоем.

При удалении из гетеросистемы областей I–III и прилегающей к металлургической границе части области IV (рис. 1) в структуре остается лишь часть эпитаксиального слоя с малым градиентом состава. При ее освещении с узкозонной стороны спектр ФП (кривая 5 на рис. 2) с точностью до погрешности измерений совпадает с кривой 1. Этого следовало ожидать, поскольку, поглощаясь в приповерхностной узкозонной области, свет не проникает в более широкозонный объем

и тот не принимает заметного участия в формировании спектра ФП.

При освещении этой структуры с широкозонной стороны максимум спектра ФП сдвигается в более коротковолновую область и его положение определяется в основном составом на ее поверхности (кривая 6 на рис. 2). Обращает на себя внимание относительное повышение фоточувствительности в коротковолновом диапазоне спектра (по сравнению с кривой 2 на этом участке), что может быть обусловлено отсутствием прилегающей к металлургической границе деструктурированной области наращиваемого слоя, а также понижением рекомбинационной активности освещаемой поверхности (за счет стимулированного квазиэлектрическим слоем варизонного объема дрейфа ННЗ в глубь образца).

При малых толщинах эпитаксиального слоя может реализоваться ситуация, когда область рекомбинационной активности металлургической границы распространяется на весь слой, который в данной ситуации становится диффузионно-тонким. В этом случае может наблюдаться уменьшение или даже полная потеря его фоточувствительности, что часто наблюдалось нами в структурах с толщиной эпитаксиального слоя  $< (10-20)$  мкм и, как упоминалось выше, отмечалось в литературе [6].

Отметим, что основные характерные особенности описанных выше спектров ФП наблюдаются в гетеросистемах КТ/КРТ, выращенных на подложках CdTe как ориентации {111}, так и ориентации {110}.

Очевидно, рассматриваемые варизонные гетеросистемы на основе КТ/КРТ с приведенными на рис. 2 формами спектров ФП могут быть использованы при реализации двухполосных фоторезистивных элементов для актуальных диапазонов ИК области спектра. Действительно, для целей дистанционного мониторинга, в том числе аэрокосмического, особенно важно, чтобы полосы фоточувствительности фотоприемников соответствовали окнам прозрачности атмосферы (0.95–1.05, 1.2–1.3, 1.5–1.8, 2.1–2.4, 3.3–4.2, 4.5–5.1, 8–13 мкм [15]), что совпадает с диапазоном фоточувствительности рассматриваемых гетеросистем.

Поскольку в соответствии с законом Рэлея для рассеяния лучистой энергии мелкими частицами пропускание атмосферы растет с увеличением длины волны, наибольшую актуальность для целей оптической связи и дистанционного мониторинга отражательных и излучательных характеристик объектов, особенно в условиях запыленной или влажной атмосферы, имеют фотоприемники, сочетающие полосы в коротко- и длинноволновом ИК диапазонах. При этом в условиях фоновых сигналов, соизмеримых с полезными, желательно подавление фоточувствительности в тех спектральных диапазонах, которые не соответствуют спектру излучения полезных сигналов. Как показано выше, это достигается введением в объем структуры параллельно освещаемой поверхности рекомбинационно-активного слоя (роль которого в рассматриваемом случае играет металлургическая граница). При этом спектральное положение полос фото-

чувствительности может технологически регулироваться составом и рекомбинационными параметрами диффузионного и эпитаксиального слоев.

#### 4. Заключение

Установлено, что обогащенная структурными дефектами область металлургической границы в эпитаксиальных варизонных гетеросистемах CdTe/CdHgTe характеризуется повышенным темпом рекомбинации и снижает фоточувствительность в средневолновом спектральном ИК диапазоне фотопроводимости таких структур, что может быть использовано при создании двухполосных фоторезистивных элементов для актуальных диапазонов ИК области спектра. При достаточно малых толщинах эпитаксиальных слоев влияние расположенной в толще структуры рекомбинационно-активной области металлургической границы может приводить к уменьшению или полной потере фоточувствительности.

#### Список литературы

- [1] Л.Н. Курбатов. *Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра* (М., Изд-во МФТИ, 1999).
- [2] В.В. Бузук, А.В. Гусаченко, П.В. Журавлев, Ю.А. Клевцов, Г.И. Косолапов, С.И. Лепин, В.А. Моисеев, Ю.Ф. Однолько, А.С. Терехов, Е.А. Терешин, С.М. Чурилов, В.Н. Федоринин, К.П. Шатунов. *16-я Межд. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения* (М., 2000) с. 26.
- [3] Г.П. Пека, В.Ф. Коваленко, А.Н. Смоляр. *Варизонные полупроводники* (Киев, Вища шк., 1989) с. 97.
- [4] I.V. Kurilo, I.O. Rudyi, O.I. Vlasenko. *J. Cryst. Growth*, **204** (4), 447 (1999).
- [5] А.И. Власенко, З.К. Власенко, И.В. Курило, И.Е. Лопатинский, И.А. Рудый, А.В. Ляшенко. *Оптоэлектрон. и полупроводн. техн.*, **39**, 48 (2004).
- [6] Л.А. Бовина, В.И. Стафеев. В кн.: *Физика соединений A<sup>II</sup>B<sup>IV</sup>*, под ред. А.Н. Георгобиани, М.К. Шейнкмана (М., Наука, 1986) гл. 8, с. 278.
- [7] O.N. Tufte, E.L. Stelzer. *J. Appl. Phys.*, **40** (11), 4559 (1969).
- [8] V. Sochinskii, S. Bernardi, E. Dieguez. *J. Cryst. Growth*, **149** (1), 35 (1995).
- [9] В.Н. Бабенцов, З.К. Власенко, А.И. Власенко, А.В. Любченко. *ФТП*, **31** (5), 523 (1997).
- [10] Н.Н. Берченко, В.Е. Кревс, В.Г. Средин. *Полупроводниковые твердые растворы и их применение* (М., Воениздат, 1982) с. 103.
- [11] Н.П. Гавалешко, П.Н. Горлей, В.А. Шендеровский. *Узкозонные полупроводники. Получение и физические свойства* (Киев, Наук. думка, 1984) с. 269.
- [12] М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. *Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников* (М., Металлургия, 1985) с. 7.
- [13] E. Finkman. *J. Appl. Phys.*, **50** (6), 4356 (1979).
- [14] А.И. Власенко, А.В. Любченко, Е.А. Сальков. *Укр. физ. журн.*, **25** (3), 434 (1980).
- [15] В.В. Козелкин, И.Ф. Усольцев. *Основы инфракрасной техники* (М., Машиностроение, 1967) с. 37.

Редактор Л.В. Шаронова

## Features of photoconductivity spectra in epitaxial graded band-gap CdTe/CdHgTe heterosystems

A.I. Vlasenko, Z.K. Vlasenko

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

**Abstract** Investigation of structural and photoelectric properties of graded band-gap CdTe/CdHgTe heterosystems enable us to ascertain that the geometrical interface of initial materials located in the structure depth is enriched with structural defects and is characterized by an increased recombination rate. It causes photosensitivity losses in the mid-part of IR range, which is observed when studying the wide-band photoconductivity spectra in these heterosystems. Under small thickness of the up-grown layer ( $< 10\text{--}20\ \mu\text{m}$ ), the influence of the metallurgical boundary can manifest itself in a decrease or full loss of the photosensitivity.