

$n$ -CuInSe<sub>2</sub>-слое, а из-за наличия потенциального барьера в валентной зоне структуры созданные при этом дырки не переходят из  $n$ -CuInSe<sub>2</sub> в  $n$ -InSe<PЗЭ>. С этой позиции объясняется также незначительность фоточувствительности изучаемых структур при освещении со стороны  $n$ -CuInSe<sub>2</sub>.

Отличие коротковолновой части спектра фоточувствительности изучаемых структур при освещении со стороны  $n$ -InSe<PЗЭ> светом с  $h\nu > \epsilon_{g1}$  от спектрального распределения фотопроводимости фоторезистора на основе  $n$ -InSe<PЗЭ> связано с уменьшением глубины поглощения коротковолновых фотонов. В результате этого

неравновесные носители заряда генерируются на участке слоя, находящимся далеко от перехода. Поэтому пространственного разделения этих электрон-дырочных пар барьером гетеропереходов не происходит.

В заключение можно отметить, что путем легирования PЗЭ типа Gd, Ho и Dy можно управлять фотоэлектрическими параметрами и характеристиками созданных методом посадки на прямой оптический контакт изотипных гетеропереходов  $n$ -InSe<PЗЭ>/ $n$ -CuInSe<sub>2</sub> в видимой и ближней ИК-областях спектра, а также создавать структуры с более стабильными свойствами.

Обнаруженное влияние легирования PЗЭ на свойства этих гетеропереходов определяется в основном процентным содержанием, а не материалом введенной примеси. Это обусловлено тем, что при легировании кристаллов  $n$ -InSe<PЗЭ> меняется их степень пространственной неоднородности.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

## Photoelectric properties of isotype heterojunctions $n$ -InSe<REE>/ $n$ -CuInSe<sub>2</sub> in visible and near IR-region

A. Sh. Abdinov, R. F. Babayeva, R. M. Ismayilov, G. H. Eyvazova  
Baku State University, Baku, Azerbaijan

*By the method of landing to optical contact isotype  $n$ -InSe<REE>/ $n$ -CuInSe<sub>2</sub> heterojunctions with percentage of introduced impurity  $N_{REE} = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  and  $10^{-1}$  at. % rare-earth elements (REE) of gadolinium, holmium and dysprosium have been created. Their photoelectric properties in photoconductivity, photoEMF and photovoltaic modes have been investigated at different orientations of incident light relative to contacting components and temperatures (77 and 300 K). Appreciable dependence of the basic photo-electric characteristics of investigated structures on  $N_{REE}$  have been found out and mechanisms for their explanations have been offered.*

УДК 621.382.002

## Разработка InGaP-фотокатода для электронно-оптических преобразователей

Н. И. Беспалко, В. И. Сахно, А. В. Долгих  
ОАО "Катод", г. Новосибирск, Россия

А. А. Мармалюк  
ФГУП «НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

*Представлена разработка InGaP-фотокатода для электронно-оптических преобразователей (ЭОП), работающих в видимом диапазоне спектра. Оптимизированы технологические и конструктивные параметры InGaP-фотокатода. С помощью метода дифракции быстрых электронов оценено качество подготовки поверхности фотокатода перед активировкой. Герметизированные в ЭОП образцы фотокатодов имели интегральную чувствительность  $S = 300$  мкА/лм и квантовую эффективность на длине волны 560 нм –  $QE = 30$ %. Намечены пути дальнейшего усовершенствования InGaP-фотокатода.*

© Беспалко Н. И., Сахно В. И., Долгих А. В., Мармалюк А. А., 2007

Широкие области применения ЭОП и постоянное повышение требований к параметрам этих приборов неуклонно ведут к совершенствованию технологии их производства и поиску новых материалов для фотокатодов.

Основным узлом ЭОП является фотокатод. В настоящее время в качестве фотокатодных узлов используются многощелочные фотокатоды и фотокатоды с отрицательным электронным сродством (ОЭС) на соединениях A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> (в основном GaAs). Перспективны-

ми материалами для фотокатодов являются тройные и четвертные соединения  $A^{III}B^V$ . Одно из главных достоинств данных материалов — зависимость основных параметров (ширина запрещенной зоны  $E_g$  и постоянная решетки  $a$ ) от состава твердого раствора.

В настоящей работе исследуется тройное соединение InGaP. Если фотокатоды на основе GaAs используются в приборах, где необходима высокая чувствительность в более длинноволновой области (приборы ночного видения), то фотокатоды на основе InGaP планируются использовать в более коротковолновой области спектра (синяя и зеленая части видимого спектра).

**Конструкция и принцип работы InGaP-фотокатода**

Процесс фотоэмиссии очень хорошо моделируется простым трехступенчатым процессом, впервые описанным Спайсером в 1958 г. [1]. Данную модель фотоэмиссии можно свести к уравнению в интегральной форме, хорошо приспособленной к цифровой обработке (численному решению)

$$Y = P \int_0^d \frac{ch \left( \frac{d-x}{L} \right) + S \cdot sh \left( \frac{d-x}{L} \right)}{ch \left( \frac{d}{L} \right) + S \cdot sh \left( \frac{d}{L} \right)} g(x) dx, \quad (1)$$

где  $Y$  — квантовая эффективность фотоэмиссии (количество эмитированных фотоэлектронов, приходящихся на один падающий фотон) для фотокатода, чувствительный слой которого имеет толщину  $d$ , диффузионную длину электронов  $L$ ;

$S$  — скорость рекомбинации на поверхности входа излучения;

$P$  — вероятность выхода электронов.

Сдвинутые в голубую область GaAs фотокатоды, описанные в [2], были изготовлены с оптимизацией параметров, связанных с поглощением для максимальной фоточувствительности в сине-зеленой области спектра.

В настоящей работе сделаны попытки получить такие же результаты не только оптимизацией соотношения поглощение/толщина, но и увеличением вероятности выхода. Это возможно, так как у InGaP больше ширина запрещенной зоны, чем у GaAs.

Законченный фотокатодный узел состоит из пяти слоев (рис. 1): входное окно из термически согласованного с InGaP-стекла; слой  $SiO_x$  (адгезионно-просветляющее покрытие), предназначенный для успешного присоединения структуры с входным окном;

буферный слой AlInGaP толщиной от 100 Å (слой с большей шириной запрещенной зоны, чем у InGaP); активный слой InGaP толщиной 0,3—1,1 мкм; слой Cs+O, снижающий работу выхода до состояния ОЭС.

Для изготовления такого фотокатода выращивают полупроводниковую гетероструктуру, состоящую из подложки, активного и буферного слоев (рис. 2). Затем на поверхность буферного слоя наносят  $SiO_x$ , и соединяют данную структуру с входным окном из стекла. После этих операций подложку стравливают, обнажая тем самым активный слой, и наносят слой Cs+O (активируют).

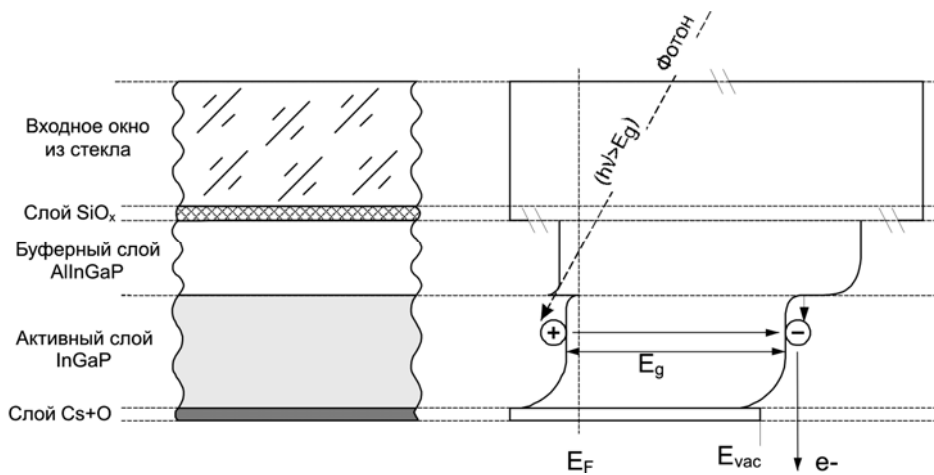


Рис. 1. Схема и зонная диаграмма фотокатодной структуры на основе InGaP

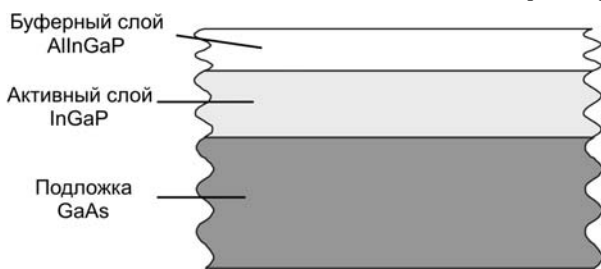


Рис. 2. Конструкция фотокатодной InGaP-гетероструктуры

**Гетероэпитаксиальная структура**

Гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках из GaAs ориентацией (100) в НИИ "Полус" (Москва).

Первоначально проводилась работа по поиску оптимального согласования кристаллической решетки твердых растворов InGaP с подложкой GaAs. В качестве параметра выступало отношение  $\Delta a/a$  (где  $\Delta a$  — раз-

ность периодов решетки эпитаксиального слоя подложки;  $a$  — период решетки подложки), определенное из рентгеновских измерений при комнатной температуре. Цель состояла в том, чтобы определить значение указанного параметра  $\Delta a/a$  при комнатной температуре, которое обеспечивает наиболее благоприятные условия осаждения твердого раствора при выбранной температуре роста, и, соответственно, качество выращенного слоя, контролируемое по интенсивности фотолюминесценции.

Из-за различного характера температурной зависимости периода решетки эпитаксиального слоя и подложки параметр  $\Delta a/a$  при температуре роста и измерений варьировал в пределах от 0,03 до 0,0009. Лучшие результаты получены при  $\Delta a/a = 0,002$ . Такой твердый раствор  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{P}$  имел максимум фотолюминесценции при  $\lambda = 653$  нм, что соответствует ширине запрещенной зоны  $E_g = 1,9$  эВ.

Уровень легирования активной области варьировал в пределах от  $8 \cdot 10^{17}$  до  $8\text{—}12 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Установлено, что интенсивность фотолюминесценции увеличивалась по мере роста уровня легирования. Однако начиная с концентрации дырок  $p = 5\text{—}6 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> наблюдалось ухудшение морфологии поверхности с образованием точечных дефектов, что неприемлемо при изготовлении фотокатода. Поэтому в качестве базового уровня легирования выбран уровень  $p = 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, обеспечивающий максимальную фотолюминесценцию одновременно с качественной морфологией поверхности гетероструктур.

Далее проводилась работа по оптимизации состава буферного слоя  $\text{InAlGaP}$ . Для избежания генерации дислокаций несоответствия состав буферного слоя подбирался таким образом, чтобы обеспечить совпадение периода решетки с подложкой. Это обусловило вариацию составов с фиксированным содержанием индия:  $\text{In}_{0,53}\text{Al}_x\text{Ga}_{0,47-x}\text{P}$ . Увеличение содержания алюминия ( $x$

$= 0,27\text{—}0,42$ ) приводит к увеличению ширины запрещенной зоны буферного слоя, что позволяет захватывать фотоны с более высокими энергиями и расширить диапазон чувствительности фотокатода в более коротковолновую область спектра. Как и в случае с уровнем легирования активной области, здесь существует верхний предел увеличения содержания алюминия (увеличения ширины запрещенной зоны), обусловленный ухудшением морфологии поверхности и появлением точечных дефектов. Баланс между приемлемым качеством поверхности и шириной запрещенной зоны достигнут в твердом растворе  $\text{InAlGaP}$  с  $E_g = 2,14$  эВ, что соответствует содержанию алюминия  $x = 0,35$ .

#### Оптимизация толщины активного слоя

Расчеты по формуле (1) показывают, что для обеспечения максимальной чувствительности фотокатода толщина активного слоя должна быть приблизительно равной диффузионной длине электронов.

Для оценки диффузионной длины электронов по форме спектральных характеристик были изготовлены три экспериментальных образца ЭОП с разными толщинами активного слоя фотокатода (0,3; 0,4; 1,1 мкм). Все конструктивные и технологические параметры фотокатодов, кроме толщин активного слоя, были идентичны. Фотокатоды обрабатывались по стандартной GaAs-технологии.

Моделирование по формуле (1) и исследование спектральных характеристик фотокатодов (рис. 3) показали наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных кривых при  $L = 0,3$  мкм,  $S = 10^4$  см/с,  $P = 0,4$ . Невысокое значение вероятности выхода электронов объясняется недостаточным качеством подготовки поверхности фотокатода (финишное травление, температурная обработка).

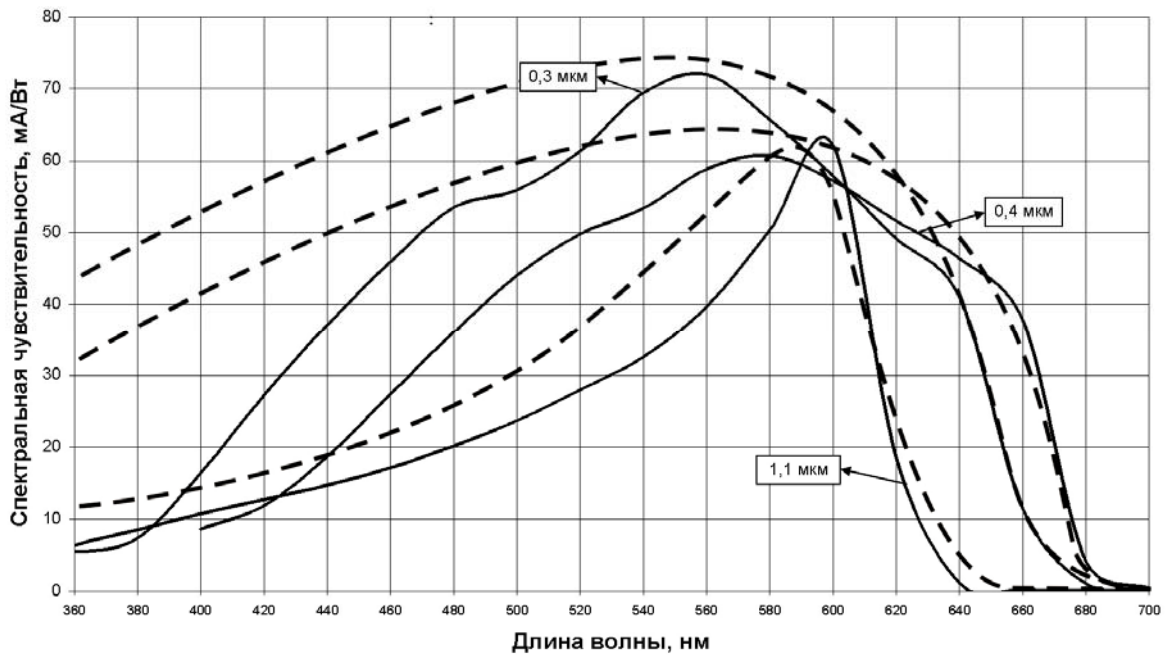


Рис. 3. Спектральные характеристики InGaP-фотокатодов с толщиной активного слоя 1,1, 0,4 и 0,3 мкм: — экспериментальные данные; ---- — расчетные данные

**Определение марки стекла для входного окна фотокатода**

Стекло для входного окна должно в достаточной мере пропускать световое излучение в диапазоне 400—800 нм и иметь согласованный коэффициент теплового расширения (КТР) с фотокатодной гетероструктурой в широком диапазоне температур, для того чтобы исключить образование дислокаций на границе буфер—активный слой в процессе температурной обработки.

В настоящей работе исследовались электровакуумные стекла, совместимые с GaAs по КТР А-54 и С-57, имеющие достаточный коэффициент пропускания света в видимом диапазоне спектра (рис. 4).

Все образцы проходили одинаковые технологические циклы GaAs-фотокатода. После активировки образцы выгружались из вакуумной камеры и вторично обрабатывались в растворе HCl:изо-пропиловый спирт, после процедура термообработки и активировки повторялась. Наименьшее снижение тока фотоэмиссии после нескольких температурных обработок, которые сопровождаются воздействием термических напряжений (термоударов), соответствует наилучшему стеклу.

Проведенные эксперименты показали, что стекло С-57 наиболее соответствует фотокатодной гетероструктуре по КТР, чем стекло А-54.

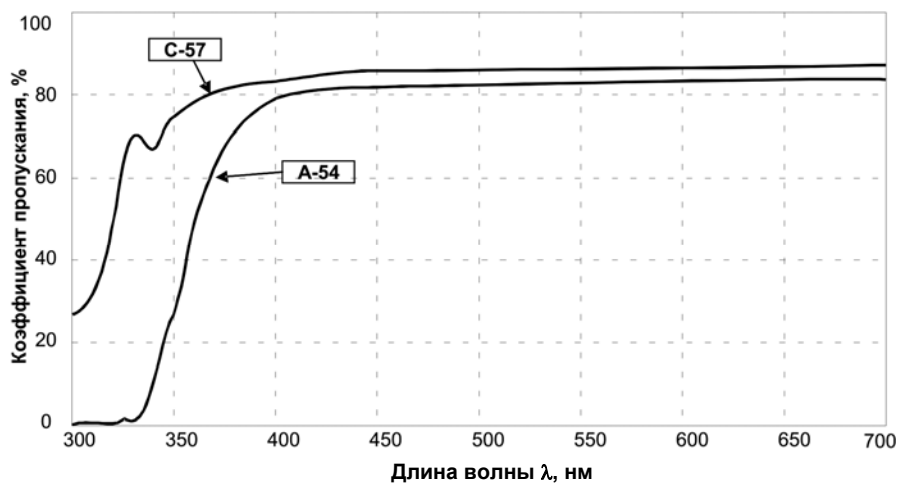


Рис. 4. Спектр пропускания входных окон из стекол А-54 и С-57

**Финишный травитель**

Финишное травление поверхности фотокатода должно обеспечивать максимально гладкую, атомарно-чистую поверхность стехиометрического состава. Кроме того, травитель должен удовлетворять требованию достаточной легкости удаления продуктов химической реакции.

Для определения оптимального травителя три аналогичных образца фотокатодного устройства (ФКУ) обрабатывались в разных травителях.

1. Раствор  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}$  (перекисно-аммиачная смесь).

2. Раствор  $\text{Br}_2$  в этиленгликоле.

3. Раствор  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ .

Все образцы проходили стандартную предварительную подготовку по технологии фотокатода ЭОП 3-го поколения [3]. По виду картин ДБЭ (дифракция быстрых электронов) в процессе прогрева ФКУ и по максимальному значению тока фотоэмиссии после активировки можно судить об эффективности финишного травителя. Результаты экспериментов по определению финишного травителя представлены ниже:

Образец (травитель)	Ток фотоэмиссии, нА
1. Раствор $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH}$	740
2. Раствор $\text{Br}_2 : \text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	540
3. Раствор $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$	514

На образце 1 наблюдалась контрастная картина ДБЭ с вытянутыми четкими рефлексами в обоих взаимортогональных азимутах. При температуре около 400 °С началось появление дробных рефлексов в азимуте [110]. При 450 °С

интенсивность дробных рефлексов, соответствующих поверхностной сверхструктуре с периодом 2а (2 постоянные решетки), на азимуте [110] была максимальной. На дифракционных картинах в азимуте [110] в ходе прогрева существенных изменений не происходило. Таким образом, можно констатировать реконструкцию (2×1) поверхности образца 1 при температуре 450 °С.

В ходе исследования образца 2 в направлениях обоих азимутов наблюдались трансмиссионные дифракционные картины (короткие прерывистые рефлексы), что соответствует грубому шероховатому рельефу поверхности. В процессе прогрева дифракционные картины существенно не изменились.

На образце 3 отмечались более длинные по сравнению с образцом 2 рефлексы, однако присутствовало

фоновое свечение (слабоконтрастная дифракционная картина), что соответствует присутствию аморфного слоя поверхностных загрязнений. В ходе прогрева картины ДБЭ стали более контрастными, однако появления дробных рефлексов не наблюдалось.

Резюмируя полученные данные, можно сказать, что перестройка структуры поверхности на картине ДБЭ образца 1 свидетельствует об очистке поверхности от адсорбированных загрязнений; более длинные рефлексы картин ДБЭ образца 1 свидетельствуют о зеркально-гладкой поверхности; наибольший ток фотоэмиссии на образце 1 подтверждает правило: для обеспечения высокой чувствительности необходима зеркально-гладкая атомарно-чистая поверхность.

Таким образом, перекисно-аммиачная смесь ( $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH}$ ) дает наилучший результат финишного травления поверхности InGaP-фотокатода.

### Термообработка в вакууме

Температура финишного прогрева образцов выбиралась относительно температуры реконструкции (2×1) поверхности InGaP-фотокатода 450 °С, установленной на этапе определения финишного травителя. В ходе исследований было установлено, что максимум fotocувствительности дают фотокатоды, прогретые до температуры 450 °С, которая соответствует реконструкции поверхности (2×1). Увеличение температуры финишного прогрева ухудшает морфологию поверхности (дробные рефлексы картины ДБЭ исчезают, основные рефлексы начинают "распушаться") и приводит к снижению тока фотоэмиссии.

На основе анализа практических результатов исследований и литературных данных была разработана технология InGaP-фотокатода. По данной технологии изготовлен ряд экспериментальных образцов ЭОП, наилучший из которых имел интегральную чувствительность 300 мкА/лм. На рис. 5 показана его спектральная характеристика. Максимум квантового выхода 30 % соответствуют длине волны 560 нм.

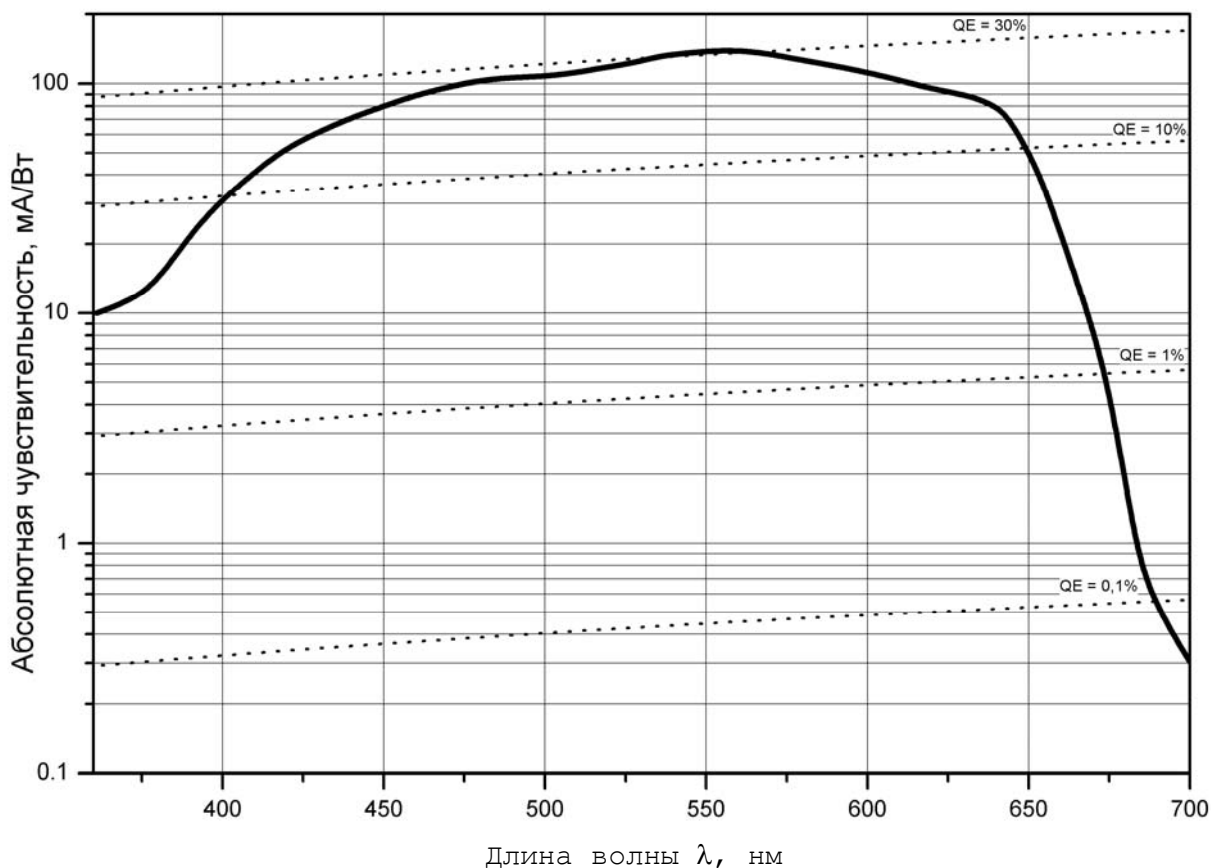


Рис. 5. Спектральная характеристика InGaP-фотокаатода, изготовленного с оптимизацией конструктивных и технологических параметров

В ходе работы были определены основные конструктивные и технологические параметры исследуемого фотокаатода, которые позволили повысить значение максимального квантового выхода с 12 до 30 %, интегральную чувствительность с 90 до 300 мкА/лм.

Для соединения InGaP достигнутое значение квантового выхода превышает максимальный квантовый выход (9 %), но уступает значению квантового выхода фотокаатодов, основанных на соединении GaAsP (более 40 %) [4].

Для дальнейшего совершенствования InGaP-фотокаатода необходимо:

- увеличение диффузионной длины электронов материала активного слоя, что возможно при выращивании более совершенных полупроводниковых структур (проработка МОС-гидридной эпитаксии InGaP, жидкофазная эпитаксия);

- более глубокое исследование влияния уровня легирования активного слоя на чувствительность фотокаатода;
- исследование широкого ряда электровакуумных стекол для входного окна фотокаатода.

**Л и т е р а т у р а**

1. Spicer W. E.// Phys. Rev, 1958. № 112, 114.
2. Costello K. A., Aebi V. W., MacMillan H. F.// Imaging GaAs Vacuum Photodiode with 40% Quantum Efficiency at 530 nm// SPIE 1992. Vol. 1665 Electron Tubes and Image Intensifiers. P. 163—171.
3. Smith A., Passmore K., Sillmon R., Benz R. Transmission Mode Photocathodes Covering the Spectral Range. New Developments in Photodetection – 3<sup>rd</sup> Beaune Conference, 2002.
4. Edgecumbe J. P., Aebi V. W., Davis G. A. A GaAsP photocathode with 40 % QE at 550 nm// SPIE 1990. V. 1224. Electron Tubes and Image Intensifiers. P. 204—210.

Статья поступила в редакцию 17 июля 2006 г.

## Development of InGaP-photocathode for image intensifier tubes

*N. I. Bepalko, V. I. Sakhno, A. V. Dolgikh*  
JSC "KATOD", Novosibirsk, Russia

*A. A. Marmalyuk*  
RDI "Polyus", Moscow, Russia

*We present the development of InGaP-photocathode for image intensifier tube operating at visible range of spectrum. As a result of the work the InGaP-photocathode technological and design parameters were optimized. Photocathode surface quality before activation process was evaluated using reflection high energy electron diffraction (RHEED). The sealed image intensifier tubes photocathodes have luminous sensitivity  $S = 300 \mu\text{A/lm}$  and quantum efficiency at wavelength 560 nm —  $QE = 30 \%$ . The ways of further improvement of InGaP-photocathode are described in conclusion.*

УДК 621.383

## Эффект подавления диффузионного тока $p$ - $n$ -перехода в пикселах многоэлементного ИК-фотоприемника, обусловленный трансляционной симметрией многоэлементной структуры

*А. Ю. Селяков*

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион" — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Показано, что при определенных условиях диффузионный ток  $I_{dm}$  центральных  $n^+$ - $p$ -переходов многоэлементного ИК-фотоприемника на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x \approx 0,2$ ) может быть существенно меньше диффузионного тока единичного  $n^+$ - $p$ -перехода на основе той же самой гетероэпитаксиальной структуры. При этом величина  $I_{dm}$  хорошо описывается в рамках одномерной модели  $n^+$ - $p$ -перехода с короткой базой и блокирующим контактом, в то время как в рассматриваемом многоэлементном ИК-фотоприемнике контакты в  $p$ -области являются омическими, и расстояние между ними и крайними пикселами превышает диффузионную длину электронов.*

В работе [1] проанализирован диффузионный ток обратномещенных  $n^+$ - $p$ -переходов на основе гетероэпитаксиальных структур из узкозонных твердых растворов ( $\text{HgCd}$ )Te, линейные размеры которых являются характерными для пикселей крупноформатных ИК-матриц, т. е. сопоставимы с диффузионной длиной электронов в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ -состава  $x \approx 0,2$   $p$ -типа. В таких малоразмерных  $n^+$ - $p$ -переходах диффузионный ток обусловлен процессами генерации — рекомбинации в примыкающей извне к периметру  $p$ - $n$ -перехода части базы, в то время как в рамках одномерной модели Шокли [2, 3] принимаются во внимание только процессы генерации — рекомбинации в части базы, непосредственно примыкающей к области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ - $n$ -перехода.

В работе [1] выявлен ряд особенностей диффузионного тока малоразмерных  $n^+$ - $p$ -переходов и показано, что при определенных условиях последний может су-

щественно превышать величину, рассчитанную в рамках одномерной модели Шокли.

В данной работе в рамках двухмерной модели проведено численное моделирование диффузионного тока  $n^+$ - $p$ -переходов на основе гетероэпитаксиальных структур из узкозонных твердых растворов ( $\text{HgCd}$ )Te, являющихся пикселами многоэлементных ИК-фотоприемников, и показано, что при определенных условиях диффузионный ток центральных пикселей многоэлементного ИК-фотоприемника может быть существенно меньше диффузионного тока единичного  $p$ - $n$ -перехода на основе той же самой гетероэпитаксиальной структуры.

### Модель

Сечение структуры многоэлементного ИК-фотоприемника изображено на рис. 1, а, представляет собой прямоугольную область длиной  $L$  и шириной  $d$ . В подложке  $p$ -типа сформированы  $n^+$ - $p$ -переходы, имеющие