

# Твердотельные преобразователи изображения на основе структур GaAs/ZnS

© В.М. Калыгина<sup>¶</sup>, А.В. Тяжев, Т.М. Яскевич

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета, 634050 Томск, Россия

(Получена 31 октября 2008 г. Принята к печати 17 ноября 2008 г.)

Исследованы вольт-яркостные характеристики и частотные зависимости яркости свечения электролюминесцентных конденсаторов на основе люминофора ZnS:Cu,Al. Изучено влияние рентгеновского излучения (17 кэВ) на высокоомные слои GaAs, полученные тремя способами. С помощью математического моделирования показана возможность создания детекторов ионизирующего излучения с оптическим считыванием информации при использовании структур GaAs/ZnS. Отмечено, что наиболее перспективным материалом для разработки твердотельных преобразователей изображения оказывается GaAs:Cr, полученный диффузией хрома из напыленного слоя.

PACS: 73.61.Ey, 78.60.Fi, 78.66.Fd, 78.66.Hf, 85.60.Jb, 85.60.Pg

## 1. Введение

Полупроводниковые детекторы заряженных частиц обладают высоким координатным разрешением и достаточным быстродействием. Коммерческие приборы подобного типа базируются на кремнии. Переход на арсенид галлия как основной материал для производства детекторов ионизирующего излучения позволяет повысить их быстродействие, увеличить разрешающую способность, расширить диапазон рабочих температур и увеличить предельно допустимую дозу, до которой приборы работают без заметного изменения параметров.

В Сибирском физико-техническом институте (СФТИ) при Томском государственном университете разработаны высокочувствительные координатные детекторы ионизирующего излучения на основе GaAs:Cr [1]. На базе этих структур предложен твердотельный преобразователь изображения (ТПИ).

В данной работе представлены результаты моделирования яркости свечения ТПИ на основе структур GaAs/ZnS при возбуждении полупроводника инфракрасным (ИК) и рентгеновским излучениями.

## 2. Методика эксперимента

Структуры изготавливали нанесением люминофора на пластины GaAs с удельным сопротивлением  $\rho \approx 5 \cdot 10^8$  Ом·см и толщиной  $d = 240$  мкм. В качестве проводящих омических контактов к люминофору и GaAs использовали слой ИТО ( $\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$ ), нанесенный на стекло.

Моделирование проводилось на основе результатов исследований яркостных характеристик разных типов электролюминесцентных конденсаторов (ЭЛК) при использовании в качестве светоизлучающего слоя сульфида цинка. Исследованы яркостные характеристики ЭЛК с электролюминофором ZnS:Cu,Al марки Э-515-115(220),

изготовленных в СФТИ, конденсаторов (ООО „Оникс“, г. Ярославль) на основе пасты фирмы DuPont марки 8154L без изолятора и с изолятором марки 8153. Изучено влияние дополнительного слоя изолятора на яркость свечения ЭЛК. Измерены частотные зависимости емкости и активной проводимости для всех видов ЭЛК.

## 3. Результаты и обсуждение

Основная длина волны излучения исследованных конденсаторов —  $(540 \pm 25)$  нм. Зависимость яркости свечения  $L$  от напряжения на конденсаторе  $U$  описывается соотношением  $L = L_0 \exp(-b/U^{0.5})$  [2], где  $L_0$  слабо зависит от напряжения, а  $b$  определяется долей люминофора в связующем диэлектрике и размером его частиц, соотношением диэлектрических проницаемостей люминофора и связующего, толщиной светоизлучающего слоя. В таблице приведены значения  $L_0$ ,  $b$  и толщины слоя люминофора. При исследовании яркостных характеристик показано, что введение дополнительного изолятора практически не изменяет яркость свечения конденсаторов уже имеющих один слой изолятора и существенно повышает свечение ЭЛК при отсутствии последнего.

Частотные характеристики яркости свечения описываются сублинейной зависимостью  $I(f)$  в интервале частот  $f = 100$ – $1000$  Гц и слабо зависят от частоты при  $f \gtrsim 1000$ – $1500$  Гц. В интервале  $f = 10^2$ – $10^6$  Гц емкость ЭЛК, изготовленных в СФТИ, снижается в 1.5 раза, а ЭЛК на основе пасты 8154L — в 1.3 раза.

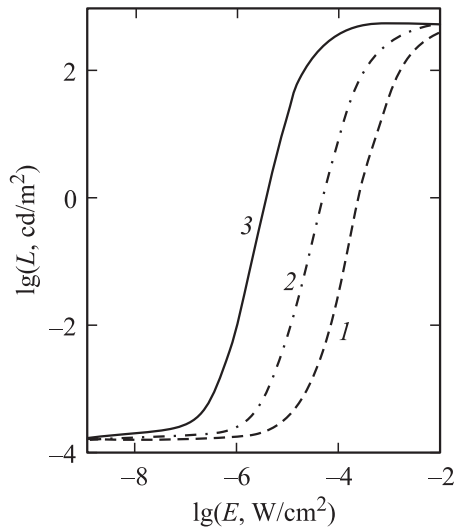
Относительное изменение удельной электропроводности арсенида галлия при воздействии ИК излучения с длиной волны  $\lambda = 925$  нм и плотностью мощности в интервале  $E = 10^{-9}$ – $10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> описывается соотношением  $\Delta\sigma/\sigma_0 \propto E^n$  с  $n = 1.06$ , 0.98 и 1.04 для диффузионного GaAs:Cr, легированного в процессе роста GaAs:Cr и нелегированного GaAs, содержащего EL2-центры, соответственно [3].

<sup>¶</sup> E-mail: kalygina@ngs.ru

Параметры электролюминесцентных конденсаторов

Тип конденсатора	№ образца	Толщина люминофора, мкм	Изолятор	Дополнительный слой изолятора	$L_0$ , кд/м <sup>2</sup>	$b$ , В <sup>0.5</sup>
Изготовленные в СФТИ (ZnS:Cu,Al)	2	36	Нет	Нет	54 180	103
	3	60			13 360	86
	6	90			109 100	126
	1	124			89 320	129
	5	138			66 170	127
	4	188			24 340	111
На основе пасты 8154L DuPont	Ia	50	Нет	Нет	29 730	113
	Iб	50	Нет	Есть	133 300	113
	IIa	50	Изолятор 8153	Нет	109 100	95
	IIб	50	DuPont	Есть	162 800	97

На рис. 1 показаны зависимости яркости свечения ТПИ от  $E$ , рассчитанные для трех типов GaAs при использовании люминофора фирмы DuPont марки 8154L и результатов ранее проведенных исследований. Кривые рассчитаны при напряжении на ЭЛК  $U = 300$  В и частоте синусоидального сигнала  $f = 400$  Гц.



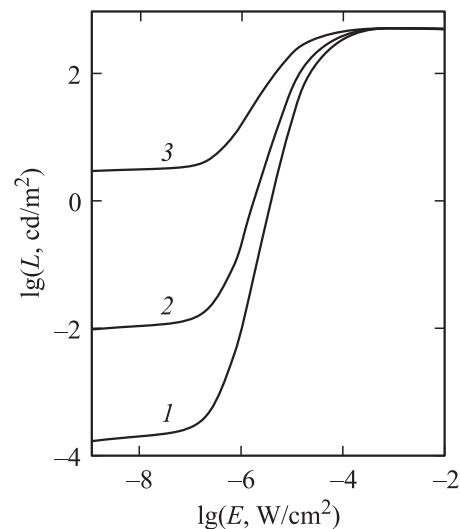
**Рис. 1.** Расчетные зависимости яркости свечения люминофора от плотности потока ИК излучения для ТПИ с люминофором 8154L и разным арсенидом галлия: 1 — GaAs с EL2-центрами; 2 — GaAs:Cr, легирование в процессе роста; 3 — GaAs:Cr, диффузионное легирование.

Из анализа данных следует, что наиболее подходящим материалом для изготовления ТПИ является GaAs, легированный Cr диффузией из напыленного слоя (рис. 1, кривая 3 и рис. 2, кривая 1). Чтобы получить  $L = 0.01$  кд/м<sup>2</sup> при  $E = 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup>, соответствующую чувствительности человеческого глаза при монохроматическом излучении, необходимо при сохранении прочих параметров сопротивление (толщину) полупроводника уменьшить в 1.5 раза (рис. 2, кривая 2). Для

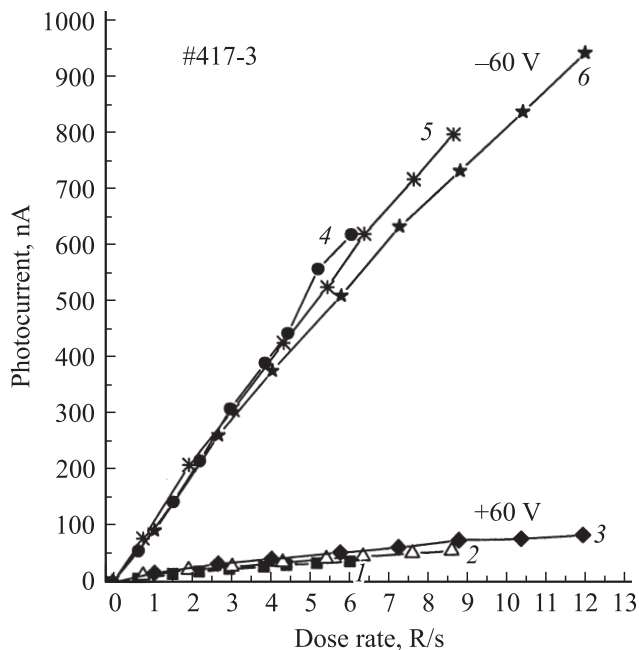
увеличения яркости свечения при  $E = 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup> до 3 кд/м<sup>2</sup> (чувствительность глаза при цветном изображении) сопротивление (толщину) GaAs нужно уменьшить в 4.5 раза (рис. 2, кривая 3).

Характерные зависимости фототока в образце GaAs:Cr от мощности дозы рентгеновского излучения с энергией кванта 17 кэВ при напряжениях на аноде рентгеновской трубки 20, 25 и 30 кВ показаны на рис. 3 при положительной (кривые 1–3) и отрицательной (кривые 4–6) полярностях потенциала 60 В электрода, через который ведется облучение полупроводника. Чувствительность фототока к мощности дозы рентгеновского излучения составляет 92.5 нА · с/Р при отрицательной и 6.8 нА · с/Р при положительной полярностях потенциала электрода со стороны излучения.

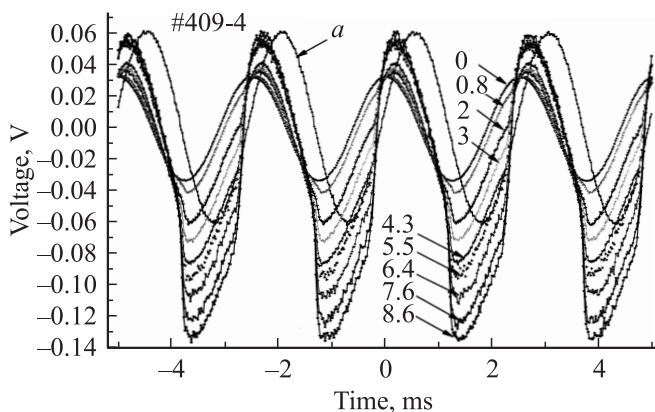
При одной и той же полярности напряжения фототок не зависит от напряжения на аноде трубки и определяется мощностью экспозиционной дозы  $P$ . Аналогич-



**Рис. 2.** Расчетные зависимости яркости свечения люминофора от плотности потока ИК излучения для толщин диффузионно-легированного GaAs:Cr  $d = 240$  (1), 160 (2), 53 мкм (3).



**Рис. 3.** Зависимость фототока детектора на основе диффузионно-легированного GaAs:Cr от мощности экспозиционной дозы при напряжениях на аноде рентгеновской трубки 20 (1, 4), 25 (2, 5), 30 (3, 6) кВ и разной полярности напряжения 60 В на электродах детектора.



**Рис. 4.** Форма сигнала, снимаемого с GaAs:Cr-детектора, при работе на синусоидальном напряжении в зависимости от мощности дозы рентгеновского излучения (значения в Р/с указаны). *a* — опорный сигнал.

ное влияние полярности напряжения наблюдается при работе детектора на синусоидальном сигнале (рис. 4). На рис. 4 показана временная зависимость выходного сигнала детектора при действии рентгеновского излучения. Напряжение на трубке — 25 кВ. Мощность дозы рентгеновского излучения изменялась от 0 до 8.6 Р/с. Измерения проведены при амплитуде переменного сигнала  $U = 58$  В и частоте 400 Гц. При сопоставлении сигнала с детектора и опорного сигнала (кривая *a*) для большей наглядности амплитуда последнего уменьшена в 747 раза.

С увеличением мощности дозы рентгеновского излучения изменяется форма сигнала детектора и уменьшается сдвиг фаз. Если мощность дозы не превышает 1 Р/с, то форма сигнала практически не изменяется и слабо выражено влияние полярности напряжения. Заметное искажение формы сигнала с детектора начинается при мощности дозы  $P \approx 2$  Р/с.

Основной причиной влияния полярности напряжения на отклик детектора является неравенство подвижностей электронов ( $\mu_n$ ) и дырок ( $\mu_p$ ),  $\mu_n \gg \mu_p$ , и существование градиента концентрации неравновесных электронов при отрицательном потенциале на облучаемом контакте. При рентгеновском излучении с энергией 17 кэВ электронно-дырочные пары (избыточные концентрации электронов и дырок  $\Delta n = \Delta p$ ) генерируются в узкой области GaAs вблизи электрода, со стороны которого ведется облучение ( $x = 0$ ). Их концентрация снижается по экспоненциальному закону при движении до противоположной границы пластины GaAs ( $x = d$ ). Выделим в полупроводнике некоторую область  $0 < x_1$  вблизи контакта, через который ведется облучение.

Рассмотрим детектор, у которого при любой мощности дозы  $P$  вольт-амперная характеристика описывается законом Ома. Падение напряжения на детекторе

$$U_d = U_{0x_1} + U_{x_1d}, \quad (1)$$

где  $U_{0x_1}$  и  $U_{x_1d}$  — соответственно падение напряжения на участках  $0 < x_1$  и  $x_1 < d$ .

Если на контакт ( $x = 0$ ) подан отрицательный потенциал, то

$$U_{0x_1} = [J_n(x) + J_p(x)]\rho x_1, \quad (2)$$

$$U_{x_1d} = J_n\rho(d - x_1), \quad (3)$$

$$U_d = JS\rho d/S = J\rho d, \quad (4)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление полупроводника,  $S$  — поперечное сечение пластины GaAs, токи  $J_n$  и  $J_p$  определяются дрейфовыми и диффузионными составляющими:

$$J_n = e\mu_n n \mathcal{E} + eD_n dn/dx, \quad (5)$$

$$J_p = e\mu_p p \mathcal{E} + eD_p dp/dx, \quad (6)$$

$\mathcal{E} = U/d$ ,  $n$ ,  $p$  — концентрации электронов и дырок,  $D_n$  и  $D_p$  — коэффициенты диффузии. Подставив (2)–(4) в уравнение (1), получим

$$J = [J_n(x) + J_p(x)]x_1/d + J_n(d - x_1)/d. \quad (7)$$

Плотности диффузионного и дрейфового токов пропорциональны подвижностям, поэтому  $J_n \propto \mu_n$ ,  $J_p \propto \mu_p$ . Так как для GaAs  $\mu_n \gg \mu_p$ , то  $J_n(x) \gg J_p(x)$ .

Если  $x_1/d < 1$ , то плотность тока будет зависеть от полярности потенциала контакта со стороны излучения.

При отрицательном потенциале на электроде в точке  $x = 0$  электроны движутся к противоположному контакту за счет диффузии и дрейфа без захвата на глубокие уровни (Cr), так как они заняты электронами, и результирующий ток  $J_- = J_n$ .

При обратной полярности внешнего напряжения электроны движутся к контакту  $x = 0$ , и диффузионной составляющей  $J_n$  можно пренебречь. К контакту в точке  $x = d$  движутся дырки, которые интенсивно захватываются на отрицательно заряженные уровни Cr. В результате их концентрация резко снижается по мере диффузии и дрейфа в объеме полупроводника. Кроме этого следует учесть, что  $\mu_p \ll \mu_n$ ,  $x_1/d \ll 1$ , и результирующий ток определяется дырочной составляющей:

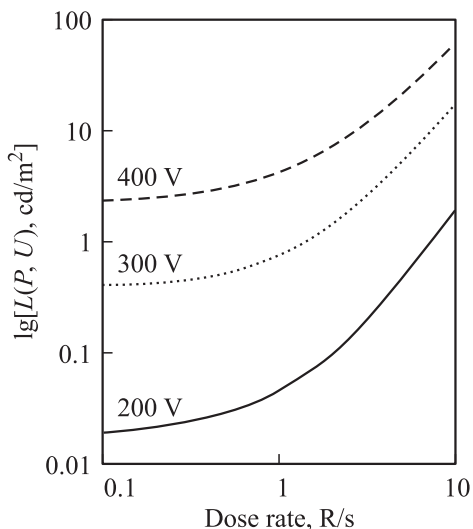
$$\begin{aligned} J_+ &= [J_n(x) + J_p(x)]x_1/d + J_p(1 - x_1/d) \\ &= J_n(x)x_1/d + J_p. \end{aligned} \quad (8)$$

Отношение токов во внешней цепи при положительной и отрицательной полярностях на электроде со стороны облучения есть

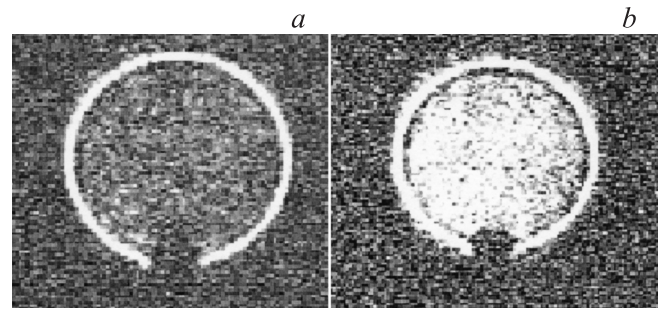
$$J_+/J_- = (J_n x_1/d + J_p)/J_n = x_1/d + J_p/J_n. \quad (9)$$

Так как  $x_1/d \ll 1$  и  $J_p \ll J_n$ , то  $J_+/J_- \ll 1$ .

Изменение формы сигнала с детектора при увеличении мощности дозы рентгеновского излучения объясняется, по-видимому, модуляцией проводимости полупроводника за счет высокого уровня возбуждения. Эффект достигается при сравнительно небольших мощностях излучения за счет низкой концентрации равновесных носителей заряда в GaAs:Cr.



**Рис. 5.** Зависимость яркости свечения люминофора от мощности дозы рентгеновского излучения для ТПИ на основе диффузионно-легированного GaAs:Cr ( $d = 240$  мкм) при напряжениях  $U = 200$ – $400$  В (значения указаны).



**Рис. 6.** Фотографии яркости свечения ТПИ при  $U = 360$  В и  $f = 1000$  Гц:  $a$  — без рентгеновского излучения;  $b$  — при  $P = 9$  P/c.

Результаты моделирования яркости свечения ТПИ при воздействии на полупроводник рентгеновского излучения с энергией 17 кэВ в зависимости от мощности дозы  $P$  показаны на рис. 5 при трех напряжениях на люминофоре. Регулируя напряжение на ТПИ, можно получить необходимую чувствительность преобразователя при низких значениях  $P$ .

Возможность разработки ТПИ на основе структур GaAs:Cr/ZnS:Cu,Al подтверждается данными рис. 6, на котором приведены фотографии свечения люминофора при напряжении 360 В и  $f = 1000$  Гц, полученные с помощью ПЗС-камеры WAT 902 В до воздействия рентгеновского излучения (рис. 6,  $a$ ) и при  $P = 9$  P/c (рис. 6,  $b$ ). Измерения проведены на ТПИ с ЭЛК на основе люминофора 8154L фирмы DuPont. Эти данные подтверждают возможность получения преобразователей изображения для низкоэнергетического рентгеновского излучения на основе структур GaAs/ZnS.

## 4. Заключение

Таким образом, исследованы вольт-яркостные характеристики и частотные зависимости яркости свечения электролюминесцентных конденсаторов на основе пасты марки 8154L фирмы DuPont. Изучено влияние рентгеновского излучения на электропроводность слоев высокоомного арсенида галлия. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в исследованных конденсаторах электролюминесцентное свечение возникает при пороговых напряжениях 135–165 В; основная длина волны излучения 540 нм (желто-зеленое свечение);
- для разработки твердотельных преобразователей изображения наиболее подходящим является арсенид галлия, диффузионно-легированный хромом;
- при воздействии рентгеновским излучением на GaAs фототок практически не зависит от напряжения на аноде трубки (20, 25 и 30 кВ) и возрастает по линейному закону с повышением мощности дозы;
- чувствительность фототока в GaAs к мощности дозы  $P$  зависит от полярности напряжения.

В работе показана принципиальная возможность создания твердотельных преобразователей изображения на основе структур GaAs:Cr/ZnS:Cu,Al с яркостью свечения, соответствующей пороговым значениям для черно-белого ( $10\text{--}2\text{ кд/м}^2$ ) и цветного ( $3\text{ кд/м}^2$ ) изображений при дозах  $0\text{--}12\text{ Р/с}$ .

Результаты работы доложены на VI Международной конференции „Аморфные и микрокристаллические полупроводники“ (Санкт-Петербург, 2008).

## Список литературы

- [1] D.L. Budnitsky, O.B. Koretskaya, V.A. Novikov, L.S. Okaevich, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.P. Vorobiev. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **A509** (1–3), 34 (2003).
- [2] О.Н. Казанкин, И.Я. Лямичев, Ю.Н. Николаев, И.Н. Орлов, Ф.В. Сорокин, Н.И. Таборко, М.В. Фок. *Прикладная электролюминесценция* (М., Сов. радио, 1974) с. 80.
- [3] Д.Л. Будницкий, В.А. Новиков, О.П. Толбанов, И.А. Прудасев. Изв. вузов. Физика, **51**, 84 (2008).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Solid-state image converter based on GaAs/ZnS structures

*V.M. Kalygina, A.V. Tyazhev, T.M. Yaskovich*

Siberian Physicotechnical Institute  
at Tomsk State University,  
634050 Tomsk, Russia

**Abstract** Brightness–voltage characteristics and dependences of a luminescence brightness on frequency of electroluminescent capacitors based on powder ZnS:Cu,Al have been investigated. X-radiation (17 keV) effect on high-resistance GaAs layers fabricated by three different ways was studied. Possibilities to develop the ionizing-radiation detectors based on GaAs/ZnS structures with optical reading of the information have been shown by means of mathematical modeling. It was noted, that the most perspective material for development of solid-state image converters appeared to be gallium arsenide doped with chrome by diffusion from a layer deposited on the semiconductor surface.