

# Особенности спектров собственной фотопроводимости в фосфиде индия, компенсированном медью

© Ф.В. Макаренко<sup>†</sup>, Н.Н. Прибылов\*, С.И. Рембеза, В.А. Мельник

Воронежский государственный технический университет,  
394026 Воронеж, Россия

\* Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, Воронежский филиал,  
394026 Воронеж, Россия

(Получена 25 сентября 2007 г. Принята к печати 17 октября 2007 г.)

Исследована собственная фотопроводимость фосфида индия, компенсированного медью. Обнаружено, что механическая полировка поверхности образца приводит к появлению в области края фундаментального поглощения дополнительного максимума фотопроводимости, исчезающего при хранении образца. Установлена зависимость вида спектра фотопроводимости от времени старения, величины электрического поля, положения светового пятна относительно контактов. Результаты объясняются изменением времени жизни неравновесных носителей заряда по глубине образца. Приводится выражение для спектров фотопроводимости, качественно описывающее эксперимент.

PACS: 81.40.Tv, 78.55.Cr, 78.66.Fd

## 1. Введение

Легирование медью монокристаллов фосфида галлия и фосфида индия приводит к их значительной компенсации и ведет к появлению у них высокой чувствительности к излучению. Основным интерес к  $\text{InP}:\text{Cu}$  обусловлен тем, что его спектр возбуждения фотопроводимости (ФП) совпадает со спектром излучения серийных светодиодов на основе  $\text{GaAs}$ , что позволяет рассматривать  $\text{InP}$  как перспективный материал для изготовления высокоэффективных резисторных оптопар. Причины высокой фоточувствительности образцов  $\text{InP}:\text{Cu}$  и  $\text{GaP}:\text{Cu}$  до конца не выяснены, но имеются данные о присутствии в запрещенных зонах полупроводниковых фосфидов двух уровней, отстоящих друг от друга на  $0.2\text{ эВ}$  [1] и расположенных над потолком валентной зоны. Авторы [2] использовали представления о возможной связи указанных уровней с особенностями локализации меди в решетке  $\text{GaP}$  для объяснения причин появления в области края фундаментального поглощения дополнительного максимума фотопроводимости в образцах  $\text{GaP}:\text{Cu}$ . Полагая, что характер поведения примеси меди в указанных полупроводниковых фосфидах близок, мы поставили целью работы поиск условий наблюдения спектральных аномалий собственной фотопроводимости в  $\text{InP}:\text{Cu}$  — ранее таких данных получено не было.

## 2. Основные экспериментальные результаты

Для легирования медью использовался фосфид индия, выращенный по методу Чохральского с концентрацией электронов  $9.3 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$ . Диффузионное насыщение медью осуществлялось из напыленной на обе поверхности пленки меди в вакуумированных кварцевых ампулах,

откачанных до  $10^{-5}$  Торр при температурах  $800\text{--}950^\circ\text{C}$ . Время диффузии  $1\text{--}12\text{ ч}$ .

После отжига ампулы закаливались в холодной воде, образцы шлифовались абразивными порошками и полировались алмазной пастой. Измерения методом эффекта Холла концентрации свободных носителей заряда в закаленных образцах показали, что после легирования возможно получение как высокоомного материала ( $n = 2.5 \cdot 10^8\text{--}10^9\text{ см}^{-3}$ ), так и низкоомного с  $n = 1.5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ . Контакты из жидкой эвтектики  $\text{In-Ga}$  наносились на полированную поверхность образцов в виде двух параллельных полосок, длиной  $2.5\text{--}3\text{ мм}$  с зазором между ними  $2.6\text{--}2.8\text{ мм}$ . Сигнал фотопроводимости измерялся в режиме постоянного поля по модуляционной методике с синхронным детектированием с частотой модуляции  $9\text{--}400\text{ Гц}$ . Для исследований брались высокоомные образцы с целью получения тока в цепи при освещении образца, значительно превышающего темновое значение.

Непосредственно после механической полировки поверхности образца алмазной пастой АСМ-0.5 в области полосы фундаментальных переходов наблюдается спектр фотопроводимости (ФП), содержащий два максимума (рис. 1). Установлено, что коротковолновый максимум исчезает примерно через двое суток после полировки в результате хранения образца на воздухе при обычных условиях. Была прослежена динамика исчезновения коротковолнового пика с течением времени (см. вставку на рис. 1). Пик полностью пропадал после отжига свежеполитованного образца в течение  $15\text{ мин}$  при температуре  $405^\circ\text{C}$  и снова появлялся после полировки.

Было исследовано влияние величины электрического поля на вид спектра ФП данного образца непосредственно после полировки. Эксперимент проводился для значений напряжений: от  $70$  до  $460\text{ В}$ . На рис. 2 показаны спектры ФП для значений  $70$  и  $460\text{ В}$ , чтобы не загромождать рисунок. На вставке к рис. 2 показаны зависимости ФП от напряжения для энергии квантов

<sup>†</sup> E-mail: phillipp@mail.ru

1.32 эВ (вблизи максимума основного пика) и 1.36 эВ (вблизи максимума дополнительного пика).

Замечено, что при фокусировке луча вблизи отрицательного контакта преобладал коротковолновый пик, вблизи положительного — длинноволновый (рис. 3). Интервал между началом двух экспериментов составлял не более 10 мин.

### 3. Обсуждение экспериментальных данных

Ранее наблюдение в спектрах ФП GaP : Cu дополнительных экстремумов за краем полосы фундаментального поглощения было объяснено в работе [2] влиянием

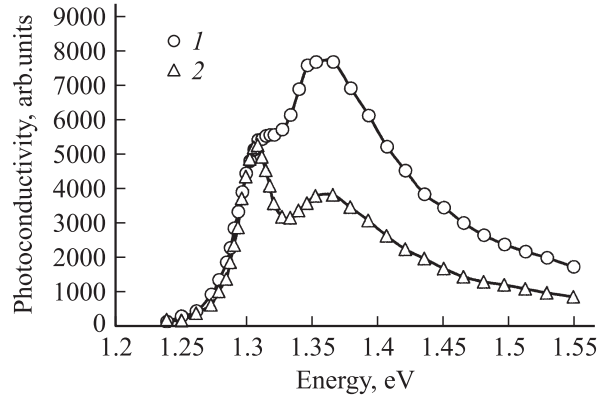


Рис. 3. Спектр фотопроводимости образца InP : Cu непосредственно после полировки при фокусировке луча вблизи положительного и отрицательного контактов при напряжении 200 В. Экспериментальные данные при фокусировке луча: 1 — вблизи отрицательного контакта, 2 — вблизи положительного контакта. Сплошные линии — аппроксимация выражением (1).

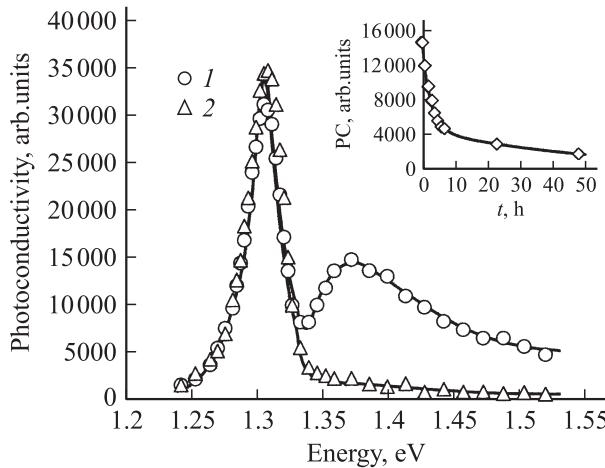


Рис. 1. Спектр фотопроводимости образца InP : Cu непосредственно после полировки и спустя двое суток. Экспериментальные данные: 1 — после полировки при напряжении 250 В, 2 — после 48 ч при напряжении 250 В. Сплошные линии — аппроксимация выражением (1). На вставке показана динамика деградации коротковолнового пика фотопроводимости (PC) при  $E = 1.375$  эВ.

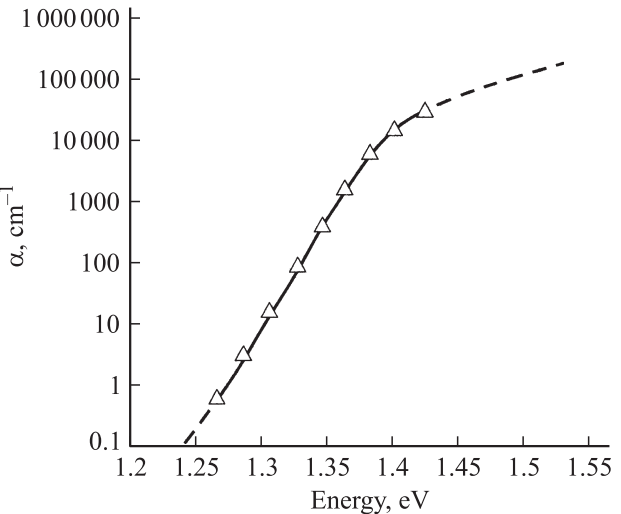


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента поглощения фосфида индия.

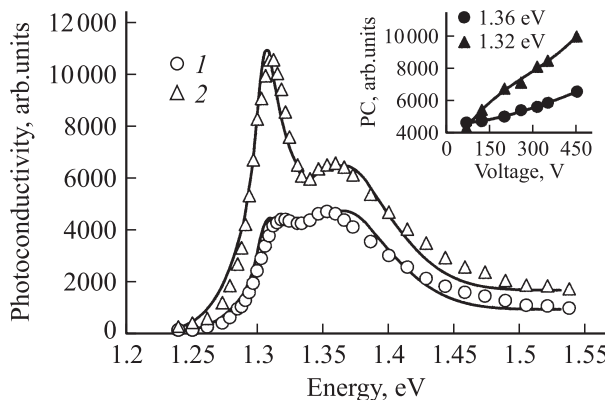


Рис. 2. Спектр фотопроводимости свежеполированного образца InP : Cu при различных напряжениях. Экспериментальные данные при напряжении, В: 1 — 70, 2 — 460; сплошные линии — аппроксимация выражением (1). На вставке показаны зависимости фотопроводимости (PC) от напряжения для энергий квантов 1.32 и 1.36 эВ.

распределения по глубине образца рекомбинационно-го параметра. Рассмотрим модель образца, состоящую из нескольких слоев. Аналогично [2] полагаем, что в InP : Cu квантовый выход  $\eta$  постоянен в каждом слое, а изменение подвижности  $\mu$  от слоя к слою мало. Тогда фотопроводимость  $\Delta\sigma$  всего образца может быть описана следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma(h\nu) = & Q_1[1 - \exp(-\alpha t_1)] \\ & + Q_2 \exp(-\alpha t_1)[1 - \exp(-\alpha t_2)] \\ & + Q_3 \exp(-\alpha t_1) \exp(-\alpha t_2)[1 - \exp(-\alpha t_3)] \\ & + Q_4 \exp(-\alpha t_1) \exp(-\alpha t_2) \exp(-\alpha t_3) \\ & \times \{1 - \exp[-\alpha(d - t_1 - t_2 - t_3)]\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_i \propto e\mu\eta\tau_i$  — коэффициент, пропорциональный времени жизни для каждого слоя  $i$ ;  $\alpha = f(h\nu)$  — спектраль-

Таблица 1.

$t, \text{ч}$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$t_1, \text{МКМ}$	$t_2, \text{МКМ}$	$t_3, \text{МКМ}$	$t_4, \text{МКМ}$	$d, \text{МКМ}$
0	4730	14945	2878	51839	0.1943	21.02	210.1	1543.7	1775
1	3890	12545	2881	51840	0.1948	21.01	210.9	1542.9	1775
2	2890	10045	2880	51843	0.1947	21.09	210.6	1543.1	1775
3	2390	8295	2877	51846	0.1942	21.05	210.4	1543.4	1775
4	1890	6645	2882	51848	0.1945	21.02	210.2	1543.6	1775
5	1540	5995	2881	51851	0.1949	21.04	210.3	1543.5	1775
6	1440	5605	2879	51852	0.1942	21.03	210.5	1543.3	1775
7	1190	5455	2883	51854	0.1944	21.06	210.8	1542.9	1775
23	590	3105	2881	51855	0.1946	21.08	210.9	1542.8	1775
48	290	1605	2882	51857	0.1941	21.07	210.4	1543.3	1775

Таблица 2.

Фокусировка луча вблизи контакта	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$t_1, \text{МКМ}$	$t_2, \text{МКМ}$	$t_3, \text{МКМ}$	$t_4, \text{МКМ}$	$d, \text{МКМ}$
+	942	4035	1803	7258	0.3938	41.12	208.9	1524.6	1775
-	1852	7885	3903	5998	0.2951	61.09	210.8	1502.8	1775

ная зависимость коэффициента поглощения InP;  $t_i$  — толщина слоя;  $d$  — толщина образца.

Коэффициент поглощения  $\alpha$  фосфида индия был измерен нами самостоятельно и результат, представленный на рис. 4, хорошо согласуется с данными [3]. Области слабого и сильного поглощения аппроксимировались.

В области фундаментального поглощения по мере увеличения энергии световых квантов коэффициент поглощения значительно возрастает, что приводит к уменьшению глубины проникновения света. Для интервала энергий от 1.25 до 1.55 эВ образец условно можно разделить на 4 слоя:  $t_1, t_2, t_3$  и  $t_4$  (см. табл. 1). Выражением (1) были описаны спектры ФП после полировки для значений времени выдержки от 0 до 48 ч. Среднеквадратичное отклонение не превышало значения  $4.287 \cdot 10^{-3}$ . Значения полученных параметров выражения (1) приведены в табл. 1.

При аппроксимации выражением (1) спектров ФП при различных напряжениях (рис. 2) было замечено, что при увеличении напряжения от 70 до 460 В параметр  $Q_1$  увеличился в 1.8 раз,  $Q_2$  и  $Q_3$  — в 1.3 раз, а  $Q_4$  — в 3 раза. Это значит, что при увеличении напряженности электрического поля более всего увеличивается время жизни носителей в глубине образца. Толщина первого слоя увеличилась в 2 раза по сравнению с данными в табл. 1, однако значение толщин остальных слоев существенно не менялись.

В табл. 2 приведены значения параметров выражения (1) для аппроксимации спектров ФП при фокусировании луча вблизи отрицательного (-) и положительного (+) контактов (рис. 3).

#### 4. Заключение

Эффект появления коротковолнового максимума может быть связан как с механическими напряжениями,

вызываемыми полировкой поверхности образца алмазной пастой, так и с наличием изменяющегося при его хранении слоя пространственного заряда, обусловленного взаимодействием поверхности InP : Cu с воздушной средой. Тот факт, что на соотношение максимумов фотопроводимости влияют как величина электрического поля, так и положение светового пятна относительно контактов, означает, что время жизни неравновесных носителей заряда изменяется по глубине образца. Это, по-видимому, связано с изменением глубины области пространственного заряда у поверхности образца под воздействием исследованных факторов, в том числе и времени хранения образцов после полировки [4]. Нельзя исключать и влияние инжекции носителей из контактов, приводящее к перезарядке примесных центров меди.

Сопоставление характера изменения параметров  $Q_i$  по слоям в случае образцов GaP и InP показывает, что в последнем случае объемное время жизни является максимальным, однако общим остается выполнение неравенства  $Q_2 > Q_3$  (при  $t \lesssim 23$  ч).

Авторы выражают признательность В.А. Буслову за полезные советы.

#### Список литературы

- [1] P.O. Fagerstorm, H.G. Grimmeis, H.H. Titze. J. Appl. Phys., **49**, 3341 (1978).
- [2] Н.Н. Прибылов, В.А. Буслов, С.И. Рембеза, А.И. Спирин, С.А. Сушков. ФТП, **33** (8), 916 (1999).
- [3] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) кн. 2.
- [4] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) кн. 1.

Редактор Т.А. Полянская

## Specific features of intrinsic photoconductivity spectrums of copper-doped indium phosphide

*P.V. Makarenko, N.N. Pribylov\*, S.I. Rembeza, V.A. Melnik*

Voronezh State Technical University,  
394026 Voronezh, Russia

\* Russian State Open Technical University  
of Railway Transport, the Voronezh Branch,  
394026 Voronezh, Russia

**Abstract** Intrinsic photoconductivity of copper-doped indium phosphide has been investigated. It was found that mechanical polishing of sample surface leads to the appearance of additional maximum of the fundamental absorption edge, that vanished during the storage of sample. Structure dependence of photoconductivity spectrum on time of aging, value of electric field, position of light spot concerning contacts is established. Interpretations of experimental results is caused by variations of the nonequilibrium carrier life time in the sample depth. Photoconductivity spectra are described qualitatively by a formula presented.