

Ultraviolet photodetector from 2a-type natural diamond for the 0.19–0.28 μm spectral range

A. A. Altukhov, V. V. Eremin, V. A. Kireev, A. V. Mitenkin
UralAlmazInvest Inc., Moscow, Russia

The single-element photodetectors with a level of photoelectric parameters, close to settlement, are obtained for the 0.19–0.28 μm spectral range. The sensitivity to the visible light misses. Direct sun rays incident on the photodetector (at an energy irradiance more than $1 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2$) excite a photoanswer, which is stipulated, apparently, by activation of local centres in a forbidden region of diamond. The limit of sensitivity on a direction on the Sun is lower than $P_r = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ W/Hz}^{1/2}$. In the 0.19–0.28 μm spectral range at $\lambda_{\text{max}} = 0.225 \mu\text{m}$ the limit of sensitivity is close to the rated level $P_r = (1-2) \cdot 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$. The physical principles of photoreception by means of natural diamond and promise for the development of multi-element diamond photodetectors are surveyed.

УДК 621.315.592

Фотопроводимость сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$, легированных галлием и иттербием

Е. П. Скипетров, Е. А. Зверева, А. В. Голубев
Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

В. Е. Слынько
Институт проблем материаловедения, г. Черновцы, Украина

Исследованы фотоэлектрические свойства сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$, легированных галлием и иттербием, при контролируемой инфракрасной (ИК) подсветке. Обнаружены эффект задержанной фотопроводимости при $T = 4,2 \text{ K}$ и долговременные процессы релаксации фотопроводимости при $T \leq T_c$. Определены основные параметры, характеризующие кинетику фотопроводимости. На кривых нарастания фотопроводимости в $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te:Ga}$ обнаружены аномальные задержка фотоотклика и пик отрицательной фотопроводимости, которые обуславливаются в предположении об индуцированном подсветкой переходе части объема кристалла в кубическую фазу.

Введение примесей с переменной валентностью (In, Ga, Cr, Gd, Eu, Yb.....) существенно модифицирует фотоэлектрические свойства полупроводников A^4B^6 [1–3]. В легированных полупроводниках при гелиевых температурах наблюдается эффект задержанной фотопроводимости, а при температурах ниже некоторой критической — долговременные релаксации неравновесных носителей заряда. При этом времена жизни неравновесных носителей заряда достигают 10^5 с . Считается, что причинами этих явлений является перестройка ближайшего кристаллического окружения примесных центров при захвате электрона на центр [4, 5]. При этом в конфигурационном пространстве возникает энергетический барьер W , препятствующий переходам электронов между локализованными и зонными состояниями.

Первыми материалами, в которых обнаружены упомянутые выше эффекты, были

$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ и PbTe:Ga [1]. Основными параметрами, определяющими возможности использования их в качестве материалов для фотоприемных устройств, являются критическая температура появления задержанной фотопроводимости T_c и величина энергетического барьера W . Критическая температура T_c определяет температурный диапазон работы фотоприемников, а барьер W — характерные времена релаксации, быстродействие или время накопления фотосигнала. Для твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ и PbTe , легированных индием и галлием, T_c составляет

25 и 70 К, соответственно. Данные о величине барьера W имеются только для материалов с индием — $W \approx 20 \text{ мэВ}$.

Поиск новых представителей этой группы фоточувствительных материалов в целом ведется по двум на-

правлениям — вариация состава матрицы и типа легирующей примеси. Основные цели таких исследований — расширение спектрального диапазона фоточувствительности, повышение критической температуры и оптимизация времен релаксации фотопроводимости.

В последние годы, в частности, начаты исследования сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$, легированных примесями галлия и иттербия. Было установлено, что легирование $Pb_{1-x}Ge_xTe$ галлием приводит к возникновению двух глубоких примесных уровней E_{Ga1} и E_{Ga} , расположенных в $PbTe$ в запрещенной зоне (E_{Ga1}) [1, 2] и на фоне состояний зоны проводимости (E_{Ga}) [6, 7], а введение иттербия приводит к возникновению глубокого примесного уровня (E_{Yb}), расположенного вблизи потолка валентной зоны [8, 9]. При увеличении содержания германия в сплаве ширина запрещенной зоны возрастает, примесные уровни попадают в запрещенную зону и реализуется диэлектрическое состояние.

Для изучения кинетики фотопроводимости при контролируемой ИК-подсветке и определения основных параметров, характеризующих долговременные релаксационные процессы, в настоящей работе исследованы фотоэлектрические явления в твердых растворах $Pb_{1-x}Ge_xTe$, легированных галлием или иттербием.

Экспериментальные методики. Образцы

Монокристаллические образцы $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$ ($0,04 \leq x \leq 0,08$, $C_{Ga} = 1,5—2$ мол. %) и $Pb_{1-x}Ge_xTe:Yb$ ($0,01 \leq x \leq 0,04$, $C_{Yb} \approx 1,0$ мол. %) были синтезированы сублимацией из паровой фазы и методом Бриджмена, соответственно. Содержание германия в сплаве контролировалось с помощью рентгенофлуоресцентного анализа, а содержание легирующей примеси оценивалось из начальной концентрации примеси в

шихте с учетом распределения по слитку в процессе роста кристалла [10].

Из монокристаллических слитков при азотной температуре выкальвались заготовки в виде параллелепипедов, из которых затем с помощью электроэрозионного станка вырезались образцы с характерными размерами $3 \times 0,7 \times 0,7$ мм. Грани образцов совпадали с направлением $\langle 100 \rangle$. Перед монтажом образцы подвергались травлению в растворе брома в бромоводородной кислоте, после чего поверхность образцов тщательно промывалась спиртом. Токовые контакты изготавливались из луженой индием медной проволоки диаметром 0,05 мм и припаивались микропаяльником к торцам образцов сплавом $In + 4\% Ag + 1\% Au$. Потенциальные и холловские контакты изготавливались из платиновой проволоки диаметром 0,03 мм и приваривались к образцу с помощью электроискровой установки.

Параметры исследованных в настоящей работе сплавов приведены в таблице. Практически все исследованные образцы находились в диэлектрическом состоянии, а образцы Yb15-1, Yb15-2 (см. таблицу) с низким содержанием германия — на границе диэлектрической фазы, т. е. положение уровня иттербия в них практически совпадало с краем валентной зоны. Для каждого образца измерены температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла ($4,2 \leq T \leq 300$ К, $B \leq 0,1$ Тл) в условиях экранировки образцов от фоновых излучений и при контролируемой подсветке источником ИК-излучения (светодиод GaAs или миниатюрная лампочка накаливания), а также кинетика фотопроводимости ($4,2 \leq T \leq 60$ К).

Параметры образцов $Pb_{1-x}Ge_xTe$, легированных Ga или Yb при $T = 4,2$ К

Образец	x	C_{Ga}, C_{Yb} , мол. %	Тип	$ R_H $, см ³ /Кл	ρ , Ом·см	n, p см ⁻³	μ_n, μ_p см ² /В·с
Ge-4-7	0,04	1,5	n	$<1 \cdot 10^3$	$9,1 \cdot 10^2$	$<3 \cdot 10^{14}$	$<1 \cdot 10^0$
Ge-6-4	0,06	1,5	n	$<1 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^1$	$<4 \cdot 10^{11}$	$<3 \cdot 10^3$
Ge-6-6	0,06	1,5	n	$<1 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^1$	$<4 \cdot 10^{11}$	$<7 \cdot 10^4$
Ge-8-2	0,08	2	n	$<6 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^1$	$<7 \cdot 10^{13}$	$<6 \cdot 10^2$
Ge-8-5	0,08	2	n	$<4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^1$	$<4 \cdot 10^{14}$	$<3 \cdot 10^2$
Yb15-1	0,009	0,8	p	$1,8 \cdot 10^3$	$7,2 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^3$
Yb15-2	0,009	0,8	p	$9,2 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^0$	$5,5 \cdot 10^{15}$	$2,7 \cdot 10^2$
Yb60-1	0,04	0,9	p	$>5 \cdot 10^7$	$>6 \cdot 10^4$	$<10^{11}$	$>8 \cdot 10^2$
Yb60-2	0,04	0,9	p	$>2 \cdot 10^6$	$>8 \cdot 10^2$	$<10^{12}$	$>3 \cdot 10^3$

Фотоэлектрические эффекты в $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$, $Pb_{1-x}Ge_xTe:Yb$

Исследование электрофизических свойств сплавов в условиях контролируемой подсветки ИК-излучением показало, что все исследованные образцы обладают заметной фоточувствительностью при низких темпера-

турах, а при гелиевых температурах наблюдается эффект задержанной фотопроводимости (рис. 1, 2). Величина фотоотклика, как оказалось, зависит от типа источника излучения. При подсветке GaAs-светодиодом наблюдается незначительное отклонение температурной зависимости сопротивления от ее вида в

условиях экранировки образцов от фоновых излучений (зависимости 2 на рис. 1). В то же время при подсветке тепловым источником происходит значительное уменьшение удельного сопротивления, причем величина фотоотклика растет с увеличением интенсивности подсветки (зависимости 3—5 на рис. 1). В области максимальных интенсивностей подсветки сопротивление изменяется более чем на порядок в образцах, легированных галлием, и превышает четыре порядка в высокоомных кристаллах, легированных иттербием. Критическая температура составила $T_c \approx 35\text{—}40$ К для сплавов, легированных иттербием, и $T_c \approx 50\text{—}60$ К — для сплавов, легированных галлием, что превышает типичные значения критической температуры в материалах, легированных индием, и немного меньше значений критической температуры, характерных для PbTe:Ga [1].

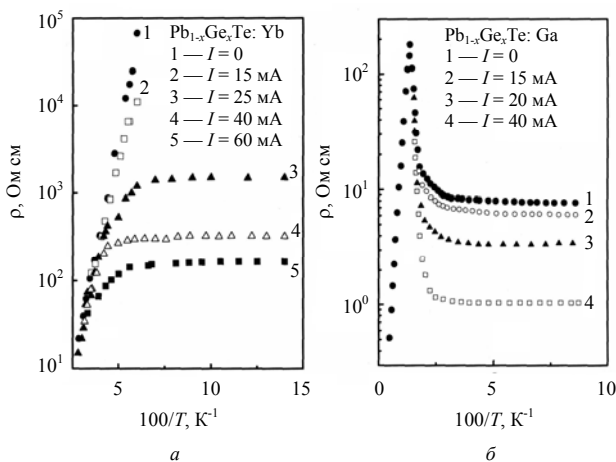


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления легированных сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ в условиях экранировки образца от фоновых излучений (1) и при подсветке источником ИК-излучения различной интенсивности (2—5): а — $x = 0,04$, $C_{Yb} = 0,9$ мол. %; б — $x = 0,06$, $C_{Ga} = 2$ мол. %

Зависимость величины фотоотклика от типа источника излучения может быть объяснена следующим образом. Излучение GaAs-светодиода можно считать практически монохроматическим с энергией квантов света $h\nu \approx 1$ эВ, существенно превосходящей ширину запрещенной зоны E_g исследуемых сплавов. Кванты света из полосы собственного поглощения интенсивно поглощаются в поверхностном слое полупроводника, и глубина их проникновения внутрь образца < 1 мкм. Таким образом, изменение проводимости происходит лишь в тонком приповерхностном слое образца, в котором время жизни неравновесных носителей заряда существенно ниже, чем в объеме из-за поверхностной рекомбинации носителей заряда. Измеряемое же в эксперименте удельное сопротивление характеризует свойства всего образца в целом, поэтому даже значительное уменьшение поверхностного сопротивления приводит лишь к малому изменению удельного сопротивления и как следствие, к низкой фоточувствительности.

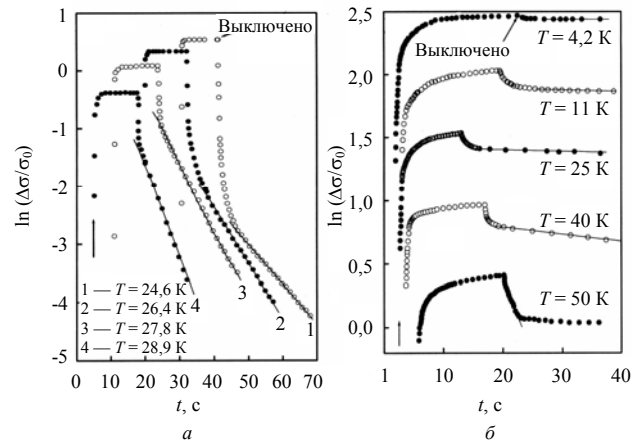


Рис. 2. Кинетика фотопроводимости легированных сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ в условиях подсветки тепловым источником ИК-излучения при различных температурах: а — $x = 0,04$, $C_{Yb} = 0,9$ мол. %, $I = 50$ мА; б — $x = 0,06$, $C_{Ga} = 2$ мол. %, $I = 40$ мА

Излучение теплового источника (миниатюрной лампы накаливания) в отличие от излучения светодиода характеризуется широким спектром, в котором присутствуют фотоны с малыми энергиями ($h\nu < E_g$) и глубокой проникновения, сравнимой с толщиной образца. Таким образом, при подсветке тепловым источником в формировании сигнала фотоотклика участвует весь объем образца, что и приводит к значительному эффекту фотопроводимости. Кроме того, необходимо иметь в виду, что, как и в других полупроводниках A^4B^6 , легированных примесями с переменной валентностью, высокая фоточувствительность исследуемых сплавов связана, очевидно, не с собственным, а с примесным поглощением света перестраивающимися янтеллеровскими центрами. В условиях же подсветки GaAs-диодом происходит не только своеобразная "засветка" поверхностного слоя образца, но и опустошение глубоких примесных центров, ответственных за аномально высокие времена жизни неравновесных носителей заряда.

Кинетика нарастания и спада фотопроводимости для легированных образцов обнаруживает сложный долговременный характер (см. рис. 2). Хорошо видно, что после выключения подсветки релаксационный процесс характеризуется наличием по крайней мере двух механизмов рекомбинации неравновесных носителей заряда с сильно различающимися временами. Оценки показали, что быстрая составляющая кинетики спада фотопроводимости характеризуется временами жизни неравновесных носителей заряда $\tau_1 < 0,1$ с, а медленная — временами $\tau_2 = 1\text{—}10^3$ с. При повышении температуры амплитуда начального быстрого спада проводимости после выключения подсветки возрастает, а характерное время медленного процесса τ_2 , полученное из наклона экспоненциального участка на релаксационных кривых (см. прямые линии на рис. 2), быстро уменьшается.

Эффект задержанной фотопроводимости и долговременные релаксационные процессы, обнаруженные в исследованных сплавах, могут быть объяснены в предположении фотоионизации свободных электронов из валентной зоны на индуцированный иттербием дефект-

ный уровень в запрещенной зоне или с индуцированно-го галлием дефектного уровня в зону проводимости при ИК-подсветке. При захвате электрона под действием ИК-подсветки вследствие ян-теллеровской неустойчивости решетки происходит перестройка кристаллического окружения дефекта, что приводит к возникновению автолокализационного энергетического барьера W , разделяющего примесные и зонные состояния в конфигурационном пространстве при низких температурах [4, 5]. Согласно теоретическим представлениям время релаксации должно экспоненциально уменьшаться с ростом температуры $\tau = \tau_0 \cdot \exp(W/kT)$, что позволяет оценить высоту энергетического барьера W . По наклону температурных зависимостей времен релаксации $\ln \tau_2(1/T)$ мы оценили величину барьера $W \approx 12$ мэВ для сплавов, легированных иттербием, и $W \approx 23$ мэВ — для сплавов, легированных галлием.

Отрицательная фотопроводимость в $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$

Необычный результат был получен при исследовании кинетики нарастания фотопроводимости в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$ (рис. 3). Установлено, что при низких температурах включение подсветки первоначально индуцирует лишь слабый положительный фотоотклик, который спустя характерное время задержки Δt , сильно зависящее от интенсивности подсветки, сменяется резким уменьшением проводимости (пик отрицательной фотопроводимости). При дальнейшем освещении образца тепловым источником ИК-излучения наблюдается нормальный положительный фотоотклик, типичный для теллурида свинца, легированного галлием [1, 2]. С ростом температуры форма пика монотонно сглаживается, амплитуда его падает, а ширина возрастает.

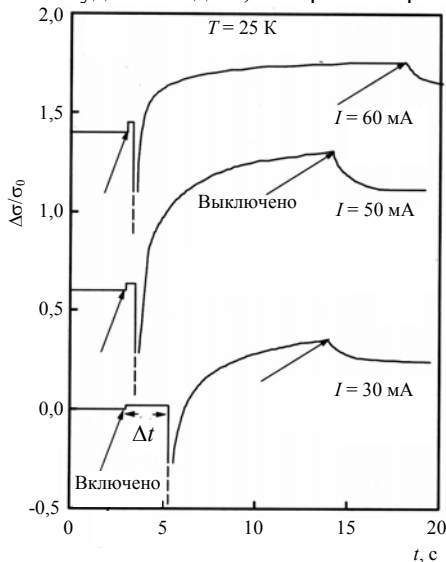


Рис. 3. Кинетика фотопроводимости в $Pb_{0.94}Ge_{0.06}Te:Ga$ при контролируемой подсветке тепловым источником различной интенсивности при $T = 25$ К

Интересно отметить, что характерное время задержки появления пика отрицательной фотопроводимости Δt почти экспоненциально уменьшается с ростом ин-

тенсивности ИК-подсветки и практически исчезает в области максимальных интенсивностей подсветки. В то же время уменьшение интенсивности подсветки приводит к заметному увеличению Δt , так что при достаточно низкой интенсивности время задержки превышало время проведения эксперимента.

Обнаруженные аномалии не имеют пока однозначного объяснения. В качестве возможного варианта объяснения нами предлагается модель, согласно которой при ИК-подсветке происходит переход по крайней мере части объема образца в кубическую фазу из-за опустошения дефектных центров в результате активации электронов с примесного уровня в зону проводимости и перестройки кристаллического окружения дефектных центров. Общий вид кинетики фотопроводимости при подсветке, отражающий предложенную концепцию, представлен на следующем модельном рисунке (рис. 4).

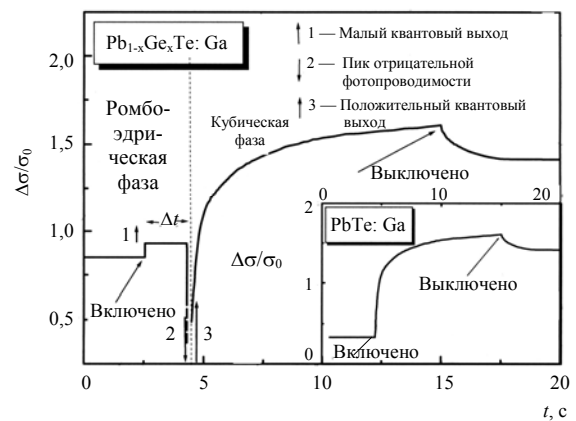


Рис. 4. Общий вид кинетики фотопроводимости в кубической и ромбоэдрической фазах в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$

В рамках такого подхода начальный положительный фотоотклик, по-видимому, связан с фотооткликом в ромбоэдрической фазе (процесс иллюстрируется стрелкой 1 на рис. 4). Затем после характерного времени задержки наблюдается переход образца в кубическую фазу под действием подсветки, сопровождающийся резким возрастанием удельного сопротивления (стрелка 2). И, наконец, в кубической фазе ИК-подсветка вызывает долговременный релаксационный процесс уменьшения сопротивления (положительную фотопроводимость) (стрелка 3), что и наблюдалось ранее в $PbTe:Ga$ (см. вставку на рис. 4). При этом время задержки можно интерпретировать как характерное время накопления искажений в кристаллическом окружении индуцированных галлием дефектных центров. Понятно, что это время должно уменьшаться с ростом интенсивности подсветки, что и наблюдается в эксперименте.

Выводы

1. Обнаружены эффект задержанной фотопроводимости и высокая фоточувствительность при $T < T_c$ в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe$, легированных Ga или Yb. Критическая температура фотопроводимости составляет $T_c \approx 60$ К для $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$ и $T_c \approx 40$ К для $Pb_{1-x}Ge_xTe:Yb$.

2. Установлено, что кинетика релаксации фотопроводимости при $T < T_c$ в $Pb_{1-x}Ge_xTe$, легированных Ga или Yb, характеризуется наличием двух типов релаксационных процессов: быстрого и медленного с характерными временами для $\tau_1 < 0,1$ с и $\tau_2 = 1-10^3$ с.

3. В предположении возникновения энергетического барьера, разделяющего примесные и зонные состояния в конфигурационном пространстве при низких температурах, оценена высота барьеров $W \approx 12$ мэВ для $Pb_{1-x}Ge_xTe:Yb$ и $W \approx 23$ мэВ для $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$.

4. На кривых нарастания фотопроводимости ($T < T_c$) сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$ обнаружены участки задержки фотоотклика и пик отрицательной фотопроводимости. Предполагается, что при стационарной ИК-подсветке сплавов происходит переход по крайней мере части объема образца в кубическую фазу в результате активации электронов с примесного уровня в зону проводимости и перестройки кристаллического окружения дефектных центров.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов Президента Российской Федерации поддержки ведущих научных школ

(ИИ 1786.2003.2) и Научной программы "Университеты России" (УР.01.03.068).

Литература

1. Akimov B. A., Dmitriev A. V., Khokhlov D. R., Ryabova L. I. // Phys. stat. sol. (a). 1993. V. 137. № 1. P. 9.
2. Волков Б. А., Рябова Л. И., Хохлов Д. Р. // УФН. 2002. Т. 172. № 8. С. 875.
3. Lead Chalcogenides: Physics and Applications ed. by D. R. Khokhlov // Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices V. 18. — New York, London: Taylor and Francis, 2003.
4. Волков Б. А., Панкратов О. А. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 1. С. 93.
5. Волков Б. А., Осипов В. В., Панкратов О. А. // ФТП. 1980. Т. 14. № 7. С. 1387.
6. Skipetrov E. P., Zvereva E. A., Skipetrova L. A., Belousov V. V., Mousalitin A. M. // J. Cryst. Growth. 2000. V. 210. № 3. P. 292.
7. Скипетров Е. П., Зверева Е. А., Белоусов В. В., Скипетрова Л. А., Слынько Е. И. // ФТП. 2000. Т. 34. № 8. С. 932.
8. Skipetrov E. P., Chernova N. A., Slyn'ko E. I., Vygranenko Yu. K. // Phys. stat. sol. (b). 1998. V. 210. № 2. P. 289.
9. Skipetrov E. P., Chernova N. A., Slyn'ko E. I., Vygranenko Yu. K. // Phys. Rev. B. 1999. V. 59. № 20. P. 12928.
10. Слынько В. Е. // Вест. Львов. унив.: Сер. Физика. 2001. Т. 34. С. 291.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Photoconductivity of the $Pb_{1-x}Ge_xTe$ alloys doped with gallium and ytterbium

E. P. Skipetrov, E. A. Zvereva, A. V. Golubev

Physics Faculty, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

V. E. Slyn'ko

Institute of Material Science Problems, Chernovtsy, Ukraine

The photoelectric properties of the $Pb_{1-x}Ge_xTe$ alloys doped with Ga and Yb were investigated under controlled infrared (IR) illumination. An effect of persistent photoconductivity at $T = 4,2$ K and long-term relaxation processes at $T \leq T_c$ were revealed. The main parameters characterizing the photoconductivity kinetics were determined. At the onset of the kinetic curve in $Pb_{1-x}Ge_xTe:Ga$, there observed an anomalous delay of the photoresponse and peak of negative photoconductivity, which are discussed assuming a photoinduced transition of the part of crystal volume to the cubic phase.

УДК 621.383.4

Характеристики позиционно-чувствительных фотоприемников на основе слоев $nCdTe:In$

Э. А. Сенокосов, В. В. Сорочан

Приднестровский государственный университет, Тирасполь, Молдова

Приведены результаты исследования выходных характеристик позиционно-чувствительных фотоприемников (ПЧФ) на основе полупроводниковых поликристаллических слоев $nCdTe:In$. Физический принцип их работы основан на выделении сигнала, возникающего в форме поперечной разности потенциалов на эквипотенциальной линии тока, при локальном освещении приемного элемента ПЧФ с четырьмя квадратно-расположенными контактами. Показано, что по ряду основных параметров выходные характеристики ПЧФ соответствуют теоретически рассчитанным.

Среди полупроводниковых датчиков особое место занимают позиционные сенсорные элементы, предназначенные для регистрации и преобразования в аналоговый или цифровой электрический сигнал информации о пространственных перемещениях механических и светоизлучающих объектов. Из позиционных видеосенсорных устройств одними из первых были разработаны ПЧФ на основе *p-n*-перехода [1], в работе которых использовался эффект возникновения продольной фотоэлектродвижущей силы при неравномерном освещении *p-n*-перехода.

Следующим этапом использования такого рода оптоэлектронных приборов явилась разработка сенсорных элементов, работа которых основывалась на координатной зависимости внутреннего сопротивления фотоприемников [2] и фотоприемников на основе МОП-структур [3].

В работах [4—6] впервые предложены и разработаны ПЧФ на основе однородных полупроводниковых пленок (пластин), работа которых основана на нетрадиционной схеме расположения и коммутации электрических контактов. Среди преимуществ фотоприемников такого рода можно выделить расширение спектров фоточувствительности за счет примесной области и существенное упрощение технологии их изготовления.

В данной работе исследованы выходные характеристики ПЧФ, изготовленных на основе поликристаллических слоев *nCdTe:In*, которые получались методом вакуумного напыления в квазизамкнутом объеме на стеклянные подложки. Легирование проводилось соиспарением атомов *In*, играющих в *CdTe* роль мелкой донорной примеси. Слои напылялись в форме диска толщиной 20—50 мкм и радиусом $R = 6$ мм. Удельное сопротивление полученных слоев в зависимости от уровня легирования изменялось от 10^3 до 10^6 Ом·см. Кратность их фотосоответа при освещенности 500 лк составляла величину 10—20.

Приемные элементы ПЧФ изготавливались следующим образом. На слой *nCdTe:In* наносились линейные индиевые контакты (*A, B, C, D*), расположенные в вершинах квадрата (рис. 1). К одной паре контактов (*A* и *C*), размещенных на концах его диагонали, подключался источник входного напряжения и через фотоэлемент пропускался ток I . К двум другим контактам (*B* и *D*), расположенным на эквипотенциальной линии тока, подключался резистор нагрузки, с которого снималось “поперечное” выходное напряжение U_{BD} , возникающее при локальной засветке поверхности приемного элемента ПЧФ. Его появление можно рассматривать как следствие разбаланса цепи интегрального электрического моста, в четырех плечах которого до освещения находятся одинаковые пространственно распределенные сопротивления полупроводникового слоя. Оптическое зондирование поверхности приемного элемента ПЧФ осуществлялось по кругу с использованием сфокусированного пучка интегрального света радиусом $a = 0,5$ мм. Выходные характеристики ПЧФ определялись величиной выходного напряжения U_{BD} , зависящего от местоположения и интенсивности светового пятна, а также от величины тока I .

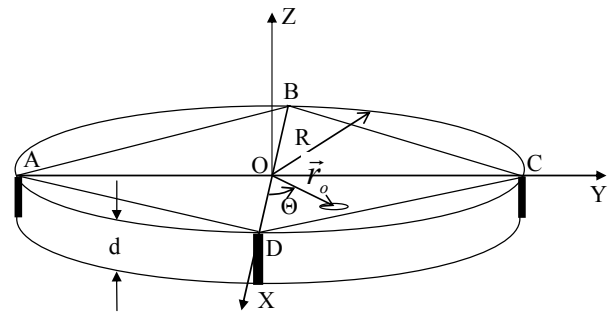


Рис. 1. Схема квадратного расположения контактов приемного элемента ПЧФ с “привязкой” координат исследуемых точек и пятна засветки

Зависимость чувствительности ПЧФ определяется особенностью распределения потенциала по поверхности фотоприемника при его локальной засветке и протекании электрического тока I . В частности, для фотоприемника, изготовленного в форме диска, по краям которого нанесены четыре квадратно-расположенных контакта

(см. рис. 1), зависимость выходного сигнала U_{BD} от координат пятна засветки определяется выражением [7]:

$$U_{BD} = \frac{\delta\sigma}{\sigma} \frac{a^2}{R^2} \frac{I}{\pi\sigma d} \frac{8r_{00}^2 \sin 2\Theta_0}{(1 - r_{00}^4)^2 + 4r_{00}^4 \sin^2 2\Theta_0}, \quad (1)$$

где $r_{00} = r_0/R$, r_0 — модуль радиус-вектора пятна засветки;

d — толщина полупроводникового диска;

Θ — угол между вектором r_0 и положительным направлением оси X ;

σ — удельная электропроводность;

$\delta\sigma$ — изменение удельной электропроводности при локальной засветке в точке r_0 .

Интенсивность использованного оптического зонда была такой, что относительная величина фотосоответа в области засветки приемного элемента ПЧФ имела значения $\delta\sigma/\sigma \leq 0,07$ и тем самым обеспечивала выполнение условия $\delta\sigma/\sigma \ll 1$, необходимого при выводе соотношения (1).

На рис. 2 представлены теоретически рассчитанные согласно (1) зависимости безразмерной разности потенциалов $V_{BD} = U_{BD}/N$ от координат пятна засветки для различных значений безразмерного радиуса зондирования r_{00} , здесь $N = (\delta\sigma a^2 I)/(R^2 \pi \sigma^2 d)$. При построении диаграмм на радиус-векторах, проведенных из начала декартовых координат X и Y , связанного с центром O фронтальной поверхности диска, под соответствующим углом Θ откладывались в выбранном масштабе абсолютные значения выходного сигнала V_{BD} . Видно, что диаграммы имеют квадратную симметрию, что является следствием квадратной симметрии приемного элемента. При переходе от одного квадранта к соседнему выходной сигнал меняет знак. Диаграммы чувствительности при $r_{00} \leq 0,7$ (см. рис. 2; кривые 1—3) представляют собой систему однолепестковых фигур, причем

бóльшим значениям r_{00} отвечают бóльшие величины $V_{AB}(\Theta)$. Для них абсолютные максимумы функции $V_{AB}(\Theta)$ лежат на биссектрисах прямых углов между диагоналями квадрата $ABCD$.

Полярные диаграммы при $r_{00} > 0,07$ представляют собой систему симметричных двулепестковых фигур (см. рис. 2; кривые 4—7). В этом случае абсолютные максимумы функции V_{AB} лежат в точках пересечения окружности сканирования со сторонами квадрата $ABCD$ (см. вставку на рис. 2). С увеличением r_{00} максимумы функции V_{AB} смещаются к ближайшим осям X и Y . При засветке точек приемного элемента, находящихся на осях X и Y , выходной сигнал равен нулю. Для значений угла $\Theta = (2n + 1)\pi/4$ с ростом r_{00} от 0 до 0,75 выходной сигнал увеличивается, а затем с дальнейшим ростом r_{00} он уменьшается.

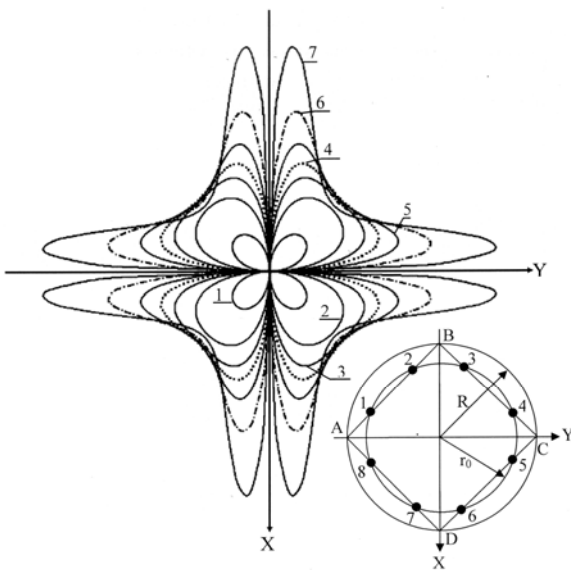


Рис. 2. Полярные диаграммы теоретической зависимости выходного сигнала ПЧФ от координат пятна локальной засветки для значений r_{00} : 1 — 0,4; 2 — 0,6; 3 — 0,7; 4 — 0,75; 5 — 0,8; 6 — 0,85; 7 — 0,9.

На вставке отмечены точки (1—8), соответствующие максимальной чувствительности ПЧФ при $r_{00} > 0,7$

На рис. 3, а представлена полярная диаграмма экспериментальной зависимости выходного сигнала U_{BD} позиционно-чувствительного фотоприемника $nCdTe:In$ от координат светового зонда, снятая для радиуса оптического зондирования $r_{00} = 0,36$ (см. рис. 3, кривая 1). Видно, что она имеет симметрию, близкую к квадратной. Знак сигнала меняется при переходе от одного квадранта к соседнему и достигает максимального значения при локальной засветке точек, расположенных вблизи биссектрис углов между осями X и $Y - r_0 = (r_0, \Theta = (2n + 1)\pi/4, n = 0, 1, 2, 3...)$. Сигнал U_{BD} принимает значения, равные нулю, при засветке точек приемного элемента ПЧФ, лежащих на осях X и $Y, - r_0 = (r_0, \Theta = n\pi/2, n = 0, 1, 2, 3...)$. На этом же рисунке приведена теоретически рассчитанная в соответствии с формулой (1) полярная диаграмма безразмерной разности потенциалов V_{BD} для

$r_{00} = 0,36$ (см. рис. 3, а; кривая 2). Она накладывалась на экспериментальную диаграмму (кривая 1) с использованием такого масштабного коэффициента, который обеспечивал лучшее их совпадение. Видно, что экспериментальная и теоретическая диаграммы хорошо коррелируют между собой как по форме, так и положению максимумов чувствительности. Экспериментальная диаграмма чувствительности ПЧФ, снятая для $r_{00} = 0,8$ (см. рис. 3, б; кривая 1), как видно, имеет по два максимума в каждом квадранте, что коррелирует с теоретическими расчетами (см. рис. 3, б; кривая 2).

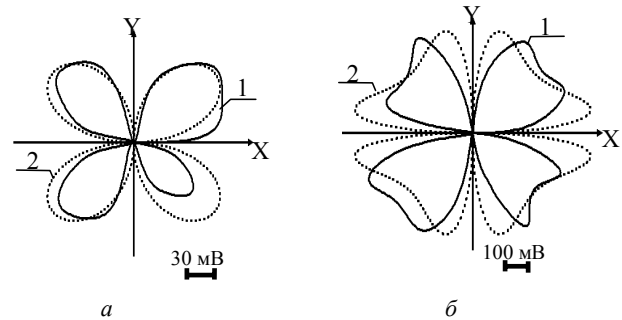


Рис. 3. Полярные диаграммы экспериментальной (кривые 1) и теоретической (кривые 2) зависимости выходного сигнала ПЧФ от координат пятна засветки для $I = 20 \text{ мкА}$ и двух значений r_{00} : а — 0,36; б — 0,8

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость выходного сигнала ПЧФ от величины тока I через фотоприемник $nCdTe:In$, снятая для трех фиксированных значений координат засветки: $r_{00} = 0,23, \Theta = \pi/4; r_{00} = 0,46, \Theta = \pi/4; r_{00} = 0,7, \Theta = \pi/4$ (кривые 1—3). Видно, что эта зависимость, как и следует из формулы (1), описывается линейной функцией. При этом с увеличением значения r_{00} при заданной величине Θ угол наклона прямой $U_{BD} = f(I)$ возрастает, что также согласуется с теоретическими расчетами. Зависимость выходного сигнала ПЧФ от интенсивности зондирующего луча (см. рис. 4; кривая 4) близка к линейной в широком диапазоне интенсивностей света.

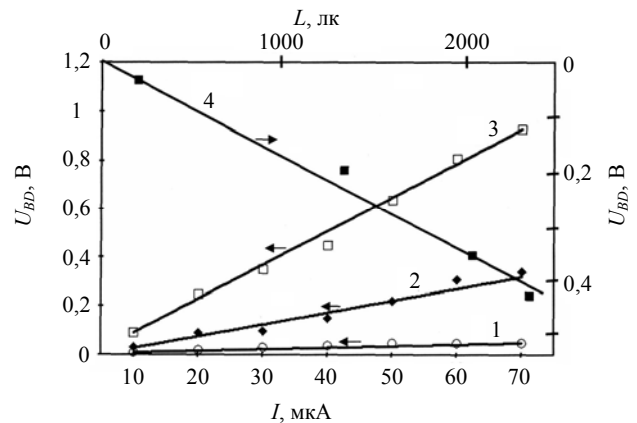


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала ПЧФ $nCdTe:In$ от величины тока через фотозлемент (кривые 1—3) для трех значений координат засветки: 1 — $r_{00} = 0,23, \Theta = \pi/4$; 2 — $r_{00} = 0,46, \Theta = \pi/4$; 3 — $r_{00} = 0,7, \Theta = \pi/4$; и от интенсивности света зондирующего пучка

(кривая 4) для $I = 40$ мкА и $r_{00} = 0,7$, $\Theta = \pi/4$

Рис. 5 отражает экспериментальную зависимость выходного сигнала ПЧФ, снятого для фиксированных значений тока $I = 20$ мкА и угла $\Theta = \pi/4$, от радиуса зондирования приемного элемента $n\text{CdTe:In}$ (кривая 1). Как видно, она хорошо коррелирует с теоретически рассчитанной зависимостью $U_{BD} = f(r_{00})$ (кривая 2).

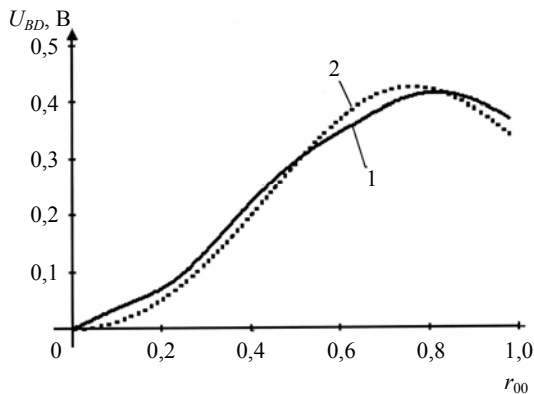


Рис. 5. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости выходного сигнала ПЧФ $n\text{CdTe:In}$ от r_{00} для значений тока $I = 20$ мкА и угла $\Theta = \pi/4$

Удельная интегральная чувствительность ПЧФ на основе слоев $n\text{CdTe:In}$, определяемая величиной выходного напряжения, отнесенного к единичным значениям тока, протекающего через фотоприемник, и мощности оптического зонда, достигает величины 6 мВ/(мкА·Вт).

Выводы

Результаты экспериментального и теоретического исследования характеристик и параметров ПЧФ, изготовленных на основе слоев $n\text{CdTe:In}$, позволяют заключить, что они согласуются, по следующим позициям:

- выходной сигнал ПЧФ меняет знак при переходе от одного квадранта приемного элемента к соседнему;
- при засветке точек приемного элемента ПЧФ, находящихся на осях X и Y , — $r_0 = (r_0, \Theta = n\pi/2, n = 0, 1, 2, 3, \dots)$, выходной сигнал равен нулю;
- для радиусов светового зондирования $r_{00} \leq 0,7$ выходной сигнал достигает максимального значения при засветке точек приемного элемента ПЧФ, находящихся на биссектрисах углов между осями X и Y ;
- для радиусов зондирования $r_{00} > 0,7$ на диаграммах зависимости выходного сигнала ПЧФ от положения пятна засветки имеются по два максимума в каждом квадранте приемного элемента;
- характер зависимости выходного сигнала ПЧФ от интенсивности и радиуса оптического зондирования, а также величины тока через приемный элемент согласуется с теоретически рассчитанной.

Имеющие некоторые отклонения экспериментальных характеристик и параметров ПЧФ от теоретически рассчитанных, очевидно, связаны с имеющей место некоторой неоднородностью поликристаллических слоев $n\text{CdTe:In}$ [8].

Литература

1. Полупроводниковые фотоприемники и преобразователи излучения/ Под ред. А. И. Фримера, И. И. Таубкина — М.: Мир, 1965.
2. Марченко А. Н., Свечников С. В., Словж А. К. Полупроводниковые сенсорные потенциометрические элементы. — М.: Радио и связь, 1988.
3. Hirohiko Niu, Chihiro Aoki, Tetsuro Matsuda, et al.// Japanese J. Appl. Phys. 1987. V. 26. № 1. P. L35.
4. Устройство для регистрации слабых световых сигналов/ Сенокосов Э. А., Клюканов А. А., Усатый А. Н., Сергеев С. А., Федоров В. М.: А. с. 1436796. СССР. 08.07.87.
5. Устройство для определения координаты светового пятна/ Клюканов А. А., Сенокосов Э. А., Усатый А. Н., Федоров В. М.: А. с. 1499119. СССР. 08.04.89.
6. Клюканов А. А., Сенокосов Э. А., Сорочан В. В., Цирулик Л. Д.// ЖТФ. 2003. Т. 73. № 5. С. 123.
7. Клюканов А. А., Сенокосов Э. А., Богинский Д. Е., Сорочан В. В., Феценко Л. В.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 1. С. 49.
8. Пат. ПИМР 262. 02.10.2003/ Сенокосов Э. А., Сорочан В. В., Цирулик Л. Д. Способ контроля качества полупроводников пленки.

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2005 г.

Performances of positionally-sensing photodetectors on the basis of stratums $n\text{CdTe:In}$

E. A. Senokosov, V. V. Sorochan

T. Shevchenko State University of Pridnestrovye, Tiraspol, Moldova

Results of examination of output characteristics of positionally-sensing photodetectors (PSP) are given on the basis of semiconductor polycrystalline layers CdTe:In . The physical principle of their operation is based on allotment of the optical signal incipient in the shape of a cross potential difference on an equipotential line of a current, at local irradiating female device PSP with four contact electrodes located in the shape of a quadrate. It is shown, that on a series of key parameters output characteristics PSP correspond theoretically designed.