

Исследование влияния γ -облучения на фоточувствительность гетеропереходов ZnO/CuIn₃Se₅

© Б.Х. Байрамов, И.В. Боднар^{*}, В.В. Емцев, Д.С. Полоскин, В.Ю. Рудь[†], Ю.В. Рудь, М.В. Якушев[×]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220030 Минск, Белоруссия

[†] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[×] Университет Стратклайда,
G40NG Глазго, Великобритания

(Получена 6 мая 2005 г. Принята к печати 8 июня 2005 г.)

Изучено влияние γ -облучения (⁶⁰Co) на фоточувствительность гетеропереходов ZnO/CuIn₃Se₅. Установлено, что спектральная зависимость эффективности фотопреобразования сохраняется при облучении гетеропереходов потоками до $2 \cdot 10^{19}$ квант/см². Изучены зависимости фотонапряжения холостого хода и тока короткого замыкания от потока γ -квантов. Показано, что при потоках $\Phi < 10^{17}$ квант/см² фотоэлектрические параметры гетеропереходов практически не изменяются, тогда как с ростом $\Phi > 10^{17}$ квант/см² фототок проявляет монотонный спад, а фотонапряжение имеет максимум, после которого возвращается к исходному значению. Обнаружена возможность использования гетеропереходов ZnO/CuIn₃Se₅ в условиях повышенного радиационного фона.

PACS: 78.66.-w, 78.66.Li, 72.40.+w, 73.50.Pz

Главными материалами полупроводниковой электроники все еще остаются элементарные (Si, Ge) и бинарные полупроводники A^{III}B^V (GaAs и др.) [1–3]. Известно, что под воздействием высокоэнергетических частиц и проникающей радиации в этих материалах возникают различные структурные превращения и точечные дефекты решетки, вызывающие изменения параметров приборов на их основе и в конечном счете выход из строя [4,5]. Что может дать в этом плане усложнение атомного состава алмазоподобных полупроводников продемонстрировали исследования по созданию фотоэлектрических преобразователей на тройных соединениях A^IB^{III}C₂^{VI}, позиционно-упорядоченных в структуре халькопирита, и их четверных твердых растворах [6–9]. Главный итог этих работ состоит в открытии феномена экстраординарной радиационной стойкости тонкопленочных фотопреобразователей из твердых растворов Cu(In,Ga)Se₂ со структурой халькопирита. Тем самым ярко проявилось еще одно важное достоинство новых сложных полупроводников, которое приобретает благодаря усложнению атомного состава в пределах семейства алмазоподобных фаз, правила образования которых сформулировала Н.А. Горюнова [10]. Данная работа принадлежит этому актуальному направлению полупроводниковой электроники и посвящена исследованиям влияния проникающего γ -облучения на фотоэлектрические свойства гетеропереходов ZnO/CuIn₃Se₅, созданных на одном из новых тройных соединений CuIn₃Se₅, образующемся при фазовом взаимодействии на квазибинарном разрезе Cu₂Se–In₂Se₃ [11,12].

Кристаллы CuIn₃Se₅ выращивались направленной кристаллизацией близкого к стехиометрии этого полупроводника расплава при вертикальном или горизонтальном расположении тигля. В последнем варианте направленной кристаллизации парциальное давление паров летучих компонентов данного соединения определялось атомным составом и температурой источника паровой фазы. Как и в случае ближайших электронных аналогов — соединений A^{II}V^{VI}, кристаллы CuIn₃Se₅ удается получать только *p*-типа проводимости.

Фоточувствительные гетеропереходы создавались на гомогенных кристаллах с удельным сопротивлением CuIn₃Se₅ $\rho \approx 10^6$ Ом·см и концентрацией свободных дырок $p \approx 10^{10}$ см⁻³ при $T = 300$ К. Электрические свойства таких кристаллов в окрестности комнатной температуры контролировались глубокими акцепторными уровнями с энергией активации ~ 0.52 эВ. Для получения гетеропереходов из таких кристаллов готовились пластины со средними размерами $0.1 \times 3 \times 5$ мм, поверхность которых полировалась механически, а затем подвергалась обработке в полирующем травителе. В качестве омического контакта к пластинам *p*-CuIn₃Se₅ использовались пленки металлического серебра, осажденные на одну из поверхностей пластины CuIn₃Se₅ в результате вакуумного ($\sim 10^{-4}$ мм рт. ст.) термического испарения. Широкозонной компонентой гетеропереходов служили слои *n*-ZnO:Al, осажденные в аргоновой среде методом магнетронного распыления пресспованной мишени ZnO с добавкой чистого алюминия. Согласно измерениям вольт-амперных характеристик, полученные гетеропереходы до их облучения имели ярко выраженные диодные характеристики, причем пропускное на-

[†] E-mail: rudvas@spbstu.ru

Фотоэлектрические параметры гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при $T = 300$ К до и после облучения γ -квантами

Φ , квант/см ²	$\hbar\omega_m$, эВ	δ , эВ	S , эВ ⁻¹	S_U^m , В/Вт
0	1.12	0.21	38	130
$6 \cdot 10^{18}$	1.12	0.22	44	—
$2 \cdot 10^{19}$	1.13	0.21	44	130

Примечание. S_U^m — максимальная вольтовая фоточувствительность.

правление соответствовало положительной полярности внешнего смещения на кристалле $p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$.

Облучение γ -квантами гетеропереходов $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ осуществлялось в нормальной воздушной среде при комнатной температуре с помощью источника непрерывного действия кобальта ^{60}Co ($E = 1.25$ МэВ) с интенсивностью $\sim 10^{13}$ квант/(см² · с).

После γ -облучения потоками до $2 \cdot 10^{19}$ квант/см² измерения стационарных вольт-амперных характеристик гетеропереходов показали, что эффект выпрямления сохраняется, однако коэффициент выпрямления с ростом потока γ -квантов падает.

На рис. 1 представлены типичные для полученных гетеропереходов спектры относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$, рассчитанной как отношение фототока короткого замыкания i_{sc} , возникающего при освещении гетероперехода со стороны слоя ZnO, к числу падающих фотонов. Облучение производилось максимальным потоком γ -квантов, использованным в этих измерениях, $\Phi_m \approx 2 \cdot 10^{19}$ квант/см² (кривая 2). Фотоэлектрические параметры гетеропереходов в зависимости от потока γ -квантов приведены в таблице. Из рис. 1 хорошо видно, что контур спектра $\eta(\hbar\omega)$ после облучения остается практически неизменным. Это означает, что процессы фотопреобразования в таких гетеропереходах оказались нечувствительными к проникающему γ -облучению. Длинноволновый край спектров фоточувствительности в гетеропереходах $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ спрямляется в координатах $(\eta\hbar\omega)^2 = f(\hbar\omega)$. Экстраполяция $(\eta\hbar\omega)^2 \rightarrow 0$ в соответствии с теорией межзонного поглощения в полупроводниках [3] позволяет определить ширину запрещенной зоны $E_g \approx 0.97\text{--}0.98$ эВ при $T = 300$ К. Эта величина не изменяется в результате γ -облучения и отражает процесс межзонного поглощения в узкозонной компоненте гетероперехода. Энергетическое положение максимума фоточувствительности $\hbar\omega_m$, а также полная ширина спектров фоточувствительности гетеропереходов на их полувысоте δ , как видно из таблицы, оказались независимыми от величины потока γ -квантов Φ . Крутизна экспоненциального длинноволнового роста η в окрестности $\hbar\omega \approx 1$ эВ, определяемая из соотношения

$$S = \frac{\Delta(\ln \tau)}{\Delta(\hbar\omega)},$$

в полученных гетеропереходах оказалась достаточно высокой. Крутизна S растет после облучения γ -квантами.

Сама величина S соответствует характеру межзонных прямых переходов в CuIn_3Se_5 , а ее возрастание после облучения гетероперехода позволяет высказать предположение о снижении концентрации дефектов решетки, ответственных за образование хвостов плотности состояний, и связанным с ним размытием края межзонного поглощения в узкозонной компоненте гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$.

На рис. 2 представлены зависимости отношений фотонапряжения холостого хода после облучения к его величине в исходном состоянии U_{oc}^{ir}/U_{oc}^{in} (кривая 1) и отношения фототока короткого замыкания i_{sc}^{ir}/i_{sc}^{in} (кривая 2) гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ в условиях освеще-

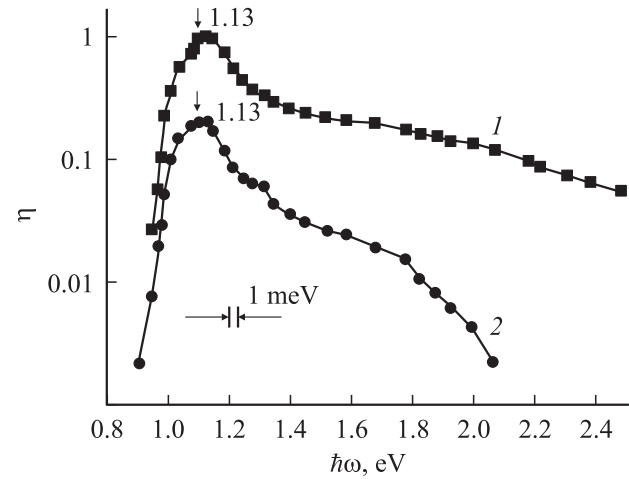


Рис. 1. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ до (кривая 1) и после γ -облучения (кривая 2, $\Phi_m = 2 \cdot 10^{19}$ квант/см²) при $T = 300$ К. Для исключения наложения кривые смещены вдоль оси ординат.

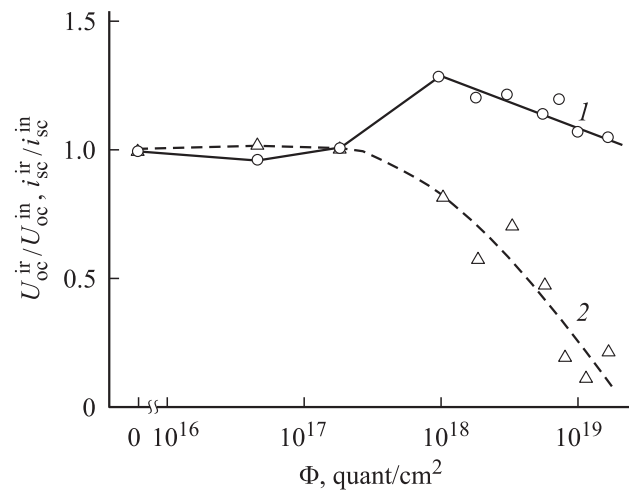


Рис. 2. Зависимости относительного изменения фотонапряжения холостого хода (кривая 1) и фототока короткого замыкания (кривая 2) от плотности потока облучения γ -квантами для гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при $T = 300$ К.

ния, близких к AM-1.5, со стороны ZnO. Видно, что для полученных гетеропереходов эти параметры обнаружили нечувствительность к проникающему γ -излучению до величины потока $\Phi \approx 10^{17}$ квант/см². С дальнейшим ростом потока вначале происходит возрастание отношения U_{oc}^{ir}/U_{oc}^{in} на $\sim 28\%$ при $\Phi \approx 10^{18}$ квант/см². Затем, как видно из рис. 2, это отношение плавно спадает до исходного состояния. Установленное увеличение фотонапряжения U_{oc}^{ir} может быть вызвано индуцированным γ -излучением изменением высоты потенциального барьера. В то же время, как можно видеть из рис. 2 (кривая 2), фототок короткого замыкания в области $\Phi > 10^{17}$ квант/см² плавно снижается и вблизи $\Phi \approx 2 \cdot 10^{19}$ квант/см² отношение $i_{sc}^{ir}/i_{sc}^{in} \approx 0.1$. Последнее позволяет предположить, что высокоэнергетичные γ -кванты в области величин потоков $\Phi > 10^{17}$ квант/см² вызывают образование в CuIn₃Se₅ дефектов решетки и возрастание скорости рекомбинации фотогенерированных пар.

Таким образом, впервые исследовано влияние γ -облучения на фотоэлектрические свойства гетеропереходов *n*-ZnO/*p*-CuIn₃Se₅ и обнаружена возможность их применения при потоках до $\Phi \approx 2 \cdot 10^{19}$ квант/см², при которых такие гетеропереходы сохраняют радиационную стойкость.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС (грант № 2001-283) и программой ОФН РАН „Новые принципы фотопреобразования в полупроводниковых гетеропереходах“.

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, N.N. Ledentsov. In: *Ioffe Institute 1918–1998. Development and Reserch Activities* (St. Petersburg, Ioffe Institute, 1998) p. 68–100.
- [2] I.V. Grekhov. In: *Ioffe Institute 1918–1998. Development and Research Activities* (St. Petersburg, Ioffe Institute, 1998) p. 119–131.
- [3] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [4] *Физические процессы в облученных полупроводниках*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1977).
- [5] *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1980).
- [6] M. Yamaguchi, C. Nemura, A. Yamamoto. *J. Appl. Phys.*, **55**, 1429 (1984).
- [7] C.F. Gay, R.R. Potter, D.P. Tanner, V.E. Anspaugh. *Proc. 17th IEEE Photov. Spec. Conf.* (1984) p. 151.
- [8] M. Yamaguchi. *J. Appl. Phys.*, **78**, 1476 (1995).
- [9] A. Jasenek, H.-W. Schock, J.H. Werner, U. Rau. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2922 (2001).
- [10] Н.А. Горюнова. *Химия алмазоподобных полупроводников* (Л., ЛГУ, 1963).
- [11] И.В. Боднар, Т.Л. Кушнер, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, М.В. Якушев. *ЖПС*, **69**, 520 (2002).
- [12] И.В. Боднар, С.Е. Никитин, Г.А. Ильчук, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. *ФТП*, **38**, 1228 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of γ -irradiation on the photosensitivity of the ZnO/CuIn₃Se₅ heterojunctions

B.Ch. Bairamov, I.V. Bodnar*, V.V. Emtsev,
D.S. Poloskin, V.Yu.H. Rud'+, Yu.V. Rud',
M.V. Yakushev \times

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Belorussian State Information and Radioelectronics
University,
220030 Minsk, Belorussia

+ St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

\times Strathclyde University,
G 40NG Glasgow, UK

Abstract The (⁶⁰Co) γ -radiation influence on the ZnO/CuIn₃Se₅ heterojunctions has been studied. It has been shown that photoelectric parameters of the heterojunctions were not virtually changed under fluxes as low as $\Phi < 10^{17}$ quantum/cm².