

Inter. Conf. on radiative physics of semiconductors and affined materials. — Kiev, 1982. P. 676—679.

4. Jafarov M. A. // Inorganic Materials. 1999. V. 35. P. 1307—1312.

5. Abdinov A. Sh., Jafarov M. A., Mekhtiev N. M., Mamedov H. M.: Proc. SPIE 4340, 2000. P. 107—111.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## Functionalities of the CdSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> films in the IR area

A. Sh. Abdinov, M. A. Dzhabarov, E. F. Nasirov, S. A. Mamedova  
Baku State University, Baku, Azerbaijan

*Results of research of photo-electric properties for the CdSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> films are shown in this article.*

УДК 621.315.592

## Радиационно-стойкие фотоприемники на область спектра 0,35—1,1 мкм

Д. Ш. Абдинов, К. А. Аскеров, В. И. Гаджиева  
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

М. Г. Бекташи  
Завод "Искра", г. Баку, Азербайджан

*Проведены разработка и исследование радиационной стойкости фотодиодов на основе слоистых соединений GaSe, InSe, GaTe, предназначенных для видимой и ближней ИК-областей спектра и процесса диффузии различных примесей в слоистых полупроводниках. Показано, что в новой технологии изготовления фотодиодных структур исходные материалы GaSe, InSe, GaTe подвергались воздействию ионизирующего облучения при малых флюенсах, а потом на них производились процессы диффузии компенсирующих элементов с предварительным отжигом. Указанные изменения в технологии получения фоточувствительных элементов позволили получить фотодиодные структуры более пяти элементов. Определена радиационная стойкость исследуемых фотодиодов и выявлена возможность использования их в условиях повышенной радиации.*

### Введение

На современном этапе развития науки одной из важнейших задач является создание фотоприемников в области спектра 0,35—1,1 мкм, работоспособных в условиях повышенной радиации.

Существующие в настоящее время фотоприемники в области спектра 0,35—1,1 мкм не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым по радиационной стойкости фотоэлектронным приборам. С другой стороны, создание фотоприемников на основе не очень дорогостоящих слоистых полупроводников, повышает эффективность, качество приборов и снижает трудоемкость при их изготовлении.

### Исследование радиационной стойкости фотодиодов

Данная работа посвящена созданию и исследованию радиационной стойкости фотодиодов на

основе монокристаллов селенида галлия, селенида индия и теллурида галлия.

Для разработки фотодиодов изучены диффузия и растворимость различных примесей в указанных выше соединениях. Известно, что олово является компенсирующим элементом для селенида галлия и теллурида галлия, а индий и серебро — наиболее подходящие контактные материалы для указанных соединений, кристаллизующихся в гексагональной слоистой структуре и по механическим и электрофизическим свойствам являющихся анизотропными.

Монокристаллы селенида индия имеют *n*-тип проводимости при 300 К, поэтому здесь выбрано в качестве компенсирующего элемента золото, являющееся акцепторной примесью. Для получения диодных структур на основе указанных соединений необходимо изучение диффузии различных примесей на эти материалы.

Для исследования диффузии использовали специально нелегированные монокристаллические

образцы GaSe *p*-типа, InSe *n*-типа, GaTe *p*-типа, имеющие удельное сопротивление при комнатной температуре  $10^2$ — $10^4$ ;  $10^2$ — $1,5 \cdot 10^2$  и  $4 \cdot 10^2$ — $10^3$  Ом·см, соответственно, выращенные методами Бриджмена–Стокбаргера и медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры.

Диффузию проводили параллельно главной оптической оси кристалла С (т. е. перпендикулярно к слоям) с помощью вакуумно напыленных на свежесколотую поверхность образцов радиоактивных изотопов  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{114\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Ag}$ ,  $^{125}\text{Te}$ ,  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  в интервале температур 200—700 °С. Время диффузионного отжига изменяли в зависимости от температуры в пределах 25—105 ч, что обеспечивало проникновение диффундирующих элементов на глубину до 500 мкм.

В целях исключения влияния радиоактивного излучения из боковых граней последние были удалены на глубину предполагаемого диффузионного слоя (~1 мм). Распределение диффундирующих элементов по глубине образца анализировали методом последовательного снятия слоев [1], а однородность распределения контролировали полойной автордиографией. Излучение регистрировали с помощью одноканальных счетчиков импульсов с погрешностью 7 %.

Поскольку во всех случаях кривые распределения концентрации диффундирующих веществ на глубине образца подчиняются стандартной функции, коэффициенты диффузии по экспериментальным данным рассчитывали при начальных и граничных условиях, соответствующих постоянному источнику [1]. Максимальное значение поверхностной концентрации ограничивается пределами растворимости примесей, диффундирующих в исследуемые образцы.

Из температурных зависимостей коэффициентов диффузии индия, серебра и олова в селениде галлия установлено, что характер изменения коэффициентов диффузии от температуры подчиняется закону Аррениуса и описывается следующими уравнениями (здесь и далее энергия активации дана в эВ):

$$D_{\text{In} \rightarrow \text{GaSe}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \exp(-0,70/\text{кТ});$$

$$D_{\text{Ag} \rightarrow \text{GaSe}} = 1,6 \cdot 10^{-9} \exp(-0,14/\text{кТ});$$

$$D_{\text{Pb} \rightarrow \text{GaSe}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \exp(-1,08/\text{кТ}).$$

Температурные зависимости коэффициентов диффузии и самодиффузии индия, теллура и кадмия в кристаллах InSe, GaTe от температуры также подчиняются экспоненциальному закону:

$$D_{\text{Te} \rightarrow \text{InSe}} = 2 \cdot 10^{-6} \exp(-0,46/\text{кТ});$$

$$D_{\text{In} \rightarrow \text{GaTe}} = 4 \cdot 10^{-9} \exp(-0,23/\text{кТ});$$

$$D_{\text{In} \rightarrow \text{InSe}} = 6,3 \cdot 10^{-2} \exp(-0,90/\text{кТ});$$

$$D_{\text{Te} \rightarrow \text{GaTe}} = 4 \cdot 10^{-6} \exp(-0,70/\text{кТ});$$

$$D_{\text{Cd} \rightarrow \text{InSe}} = 1,45 \cdot 10^{-8} \exp(-0,27/\text{кТ});$$

$$D_{\text{Cd} \rightarrow \text{GaTe}} = 0,5 \cdot 10^{-5} \exp(-1,44/\text{кТ}).$$

Малые значения энергии активации диффузии индия, серебра, теллура и кадмия в исследуемых кристаллах говорят о том, что диффузия этих примесей носит одинаковый характер и происходит по межузельному механизму. Самодиффузия индия и теллура в кристаллах InSe и GaTe, а также диффузия олова в GaSe и кадмия GaTe характеризуются сравнительно высокими значениями энергии активации. Это дает основания предполагать, что упомянутые процессы в основном осуществляются по вакансиям соответствующих элементов в указанных соединениях. Целесообразно подчеркнуть, что поскольку диффузия происходила в направлении, перпендикулярном к слоям, то полная вероятность миграции диффузанта через кристалл в указанном направлении должна определяться произведением двух вероятностей: вероятности миграции через собственные слои и вероятности прохождения через потенциальный барьер, образуемый межслоевым "промежутком". Сама прослойка может представлять собой сток или место, где диффузанта может накапливаться, что также должно отражаться в параметрах диффузионного процесса. Полученные данные использованы для получения электронно-дырочных переходов.

В работе [2] подробно описаны разработки физических основ конструкции и технологии изготовления фотодиодов на основе селенида галлия, селенида индия и теллурида галлия. В новой технологии изготовления фотодиодных структур исходные материалы GaSe, GaTe и InSe подвергались воздействию ионизирующего облучения при малых флюенсах, а потом на них производились процессы диффузии компенсирующих элементов с предварительным отжигом. Указанные изменения в технологии получения фоточувствительных элементов позволили получить фотодиодные структуры более пяти элементов. Исследуемые фотодиоды обладали фоточувствительностью в области спектра 0,35—1,1 мкм с максимумами  $\lambda_{\text{GaSe}} = 0,63$  мкм,  $\lambda_{\text{InSe}} = 0,95$  мкм и  $\lambda_{\text{GaTe}} = 0,85$  мкм при комнатной температуре, а также были получены сравнительно повышенные фотоэлектрические параметры прежней технологии.

Основные характеристические параметры таких фотодиодов приведены в таблице.

Фотодиоды	Условия эксплуатации			$I$ , мкА	$C_{abs}$ , А/Вт	$S$ , В/Вт	$I_{int}$ , мА/лм	$R$ , Ом
	$U_{disp}$ , В	$\lambda_{max}$ , мкм	$T$ , К					
Pb- <i>p</i> -GaSe	3	0,63	300	0,03	1,0—2,5	(4,1—8,1)·10 <sup>4</sup>	10—30	10 <sup>7</sup>
	5	0,55	300	0,04	0,5—0,10	(2,4—6,0)·10 <sup>4</sup>	3—20	
Ag- <i>n</i> -InSe	3	0,95	300	0,04	0,5—6,0	(2,3—9,1)·10 <sup>4</sup>	10—30	10 <sup>5</sup> —10 <sup>6</sup>
	3	0,95	263	0,04	0,7—9,2	(4,9—9,8)·10 <sup>4</sup>	15—30	
Pb- <i>p</i> -GaTe	3	0,85	300	0,05	0,6—2,5	(2,0—6,3)·10 <sup>4</sup>	3—20	10 <sup>5</sup> —10 <sup>7</sup>
	5	0,85	300	0,05	1,1—3,2	(2,5—7,5)·10 <sup>4</sup>	5—22	

Для определения стойкости к ионизирующим излучениям изучены воздействия различных видов облучения на фотоэлектрические параметры фотодиодов.

До, после и в процессе облучения низкоэнергетическими электронами с энергией 6 МэВ (флюенсом  $10^{12}$ — $10^{16}$  см<sup>-2</sup>) и гамма-квантами (флюенсом  $10^5$ — $10^8$  Р), высокоэнергетическими электро-

нами с энергией 25 МэВ (флюенсом  $10^{12}$ — $10^{16}$  см<sup>-2</sup>), протонами (флюенсом  $10^{12}$ — $10^{14}$  см<sup>-2</sup>), нейтронами ( $10^{11}$ — $10^{14}$  см<sup>-2</sup>) измерялись вольт-амперные (ВАХ), спектральные характеристики фотодиодов на основе селенида галлия, селенида индия и теллурида галлия. При этом контролировались изменения монохроматической интегральной и вольт-ваттной чувствительности фотодиодов. Кроме того, определены времена потери работоспособности фотодиодов в процессе импульсного гамма-нейтронного и импульсного гамма-облучения по восстановленным значениям напряжения сигнала и шума. При воздействии проникающей радиации возникает широкий диапазон изменений параметров фотодиодов вследствие изменения характеристик полупроводниковых материалов [3].

Анализ ВАХ прямосмещенных фотодиодов, облученных различными частицами, показывает, что с ростом флюенса облучения токи прямых и обратных ветвей ВАХ увеличиваются, при этом коэффициент качества  $\beta$  резко возрастает ( $2 \leq \beta \leq 5$ ), что можно связать с образованием поверхностных каналов проводимости. Увеличение темновых токов связано с возрастанием токов за счет ионизационных эффектов в объеме фотодиода.

На основании измерений спектральных характеристик фотодиодов до и после различных видов ионизирующих излучений установлено, что изменения фоточувствительности фотодиодов на основе GaSe, InSe и GaTe носят одинаковый характер: при малых флюенсах облучения фоточувствительность увеличивается, а большие флюенсы приводят к уменьшению фоточувствительности.

В целях изучения причины изменений фоточувствительности фотодиодов измерены времена жизни основных носителей тока после облучения электронами с энергией 25 МэВ, импульсными нейтронами и гамма-квантами. Установлено, что

увеличение интегрального флюенса электронов с энергией 25 МэВ и импульсных нейтронов время спада фототока монотонно уменьшается, а низкоэнергетическое облучение приводит к росту времени спада фототока. Поэтому можно предположить, что изменение времени жизни — это один из основных факторов, ответственных за изменение фоточувствительности облученных фотодиодов.

В процессе проведения исследований на импульсной гамма-установке и на импульсном реакторе снимались осциллограммы изменения напряжения сигнала и напряжения шумов по двум каналам с двух фотодиодов одновременно для определения времени потери работоспособности. В результате измерений на импульсной гамма-установке при эффективной длительности импульса  $\tau = 10,3$ — $10,9$  нс по значению  $U_c$  при мощности  $P_\gamma = 1,7 \cdot 10^{10}$  Р/с время потери работоспособности фотодиодов на основе исследуемых соединений составляет  $\tau_{loss} \leq 1,0$  с, а по значению  $U_d$  при мощности  $P_\gamma = 3,08 \cdot 10^{10}$  Р/с —  $\tau_{loss} \leq 0,05$  с. В результате измерений на импульсном реакторе найдены следующие величины для  $\tau_{loss}$ : при флюенсе нейтронов  $\Phi_N = 3,08 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> —  $\tau_{loss} \leq 1,8$  с по восстановлению  $U_c$ , а по восстановлению  $U_d$  при флюенсе  $\Phi_N = 3,35 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> —  $\tau_{loss} \leq 0,01$  с.

Через 6—11 сут после облучения на этих же фотодиодах снималось спектральное распределение чувствительности. После облучения при малых флюенсах их чувствительность увеличивается, и максимум ее сдвигается в длинноволновую область спектра. Соответственно увеличивается их монохроматическая и вольт-ваттная чувствительность примерно в 2—3 раза. С другой стороны, не исключается возможность того, что при малых флюенсах облучения может происходить в основном перераспределение примесей золота и олова, вследствие чего получается более совершенный и стабильный *p-n*-переход и фоточувствительность фотодиодов увеличивается.

Невысокие энергетические барьеры, существующие в межслойном промежутке слоистых материалов, благоприятствуют миграции радиационных дефектов с ростом флюенсов облучения. Это в свою очередь облегчает процесс образования

комплексов из радиационных и исходных дефектов межслойных промежутков. Вследствие этого происходит образование новой высокоомной прослойки, приводящий к некоторому ухудшению фотоэлектрических параметров с ростом флюенса облучения. Следует отметить, что при воздействии ионизирующих излучений в указанных выше интервалах флюенсов на фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе GaSe, InSe и GaTe изменение значений основных характеристических параметров не превышает 30 %.

### Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что фотоприемники на основе слоистых

соединений GaSe, InSe и GaTe открывают возможность их использования в системах, работающих в видимой и ближней ИК-областях спектра, в частности, в астронавигации.

### Литература

1. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. — М.: Наука, 1961. — 462 с.
2. Аскеров К. А., Исаев Ф. К., Амиров Д. Г. Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых слоистых полупроводниках. — Баку, 1991. — 126 с.
3. Косенко В. Е. Диффузия сурьмы и цинка из паровой фазы в германии// Известия АН СССР. Сер. физ. 1956. Т. 20. № 12. С. 1526—1530.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## Radiation-resistant photodetectors for the 0.35—1.1 $\mu\text{m}$ area

D. Sh. Abdinov, K. A. Askerov, V. I. Gadzhieva  
Institute of Physics, Baku, Azerbaijan

M. G. Bektashi  
Spark Factory, Baku, Azerbaijan

*The article is devoted to development and research of radiating stability of photodiodes on the basis of layered compounds. These devices are intended for the visible and near IR area of a spectrum. Processes of diffusion of various impurities in such layered semiconductors are considered.*

УДК 621.315.592

## Влияние ионизирующих излучений на фотодиоды с термоэлектрическим охладителем на основе селенида индия

К. А. Аскеров, В. И. Гаджиева, Д. Ш. Абдинов  
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

*Исследовалось влияние имитирующих факторов ядерного взрыва и протонного облучения на фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе селенида индия. Установлено, что импульсное гамма-излучение и импульсное нейтронное облучение приводят к улучшению фотоэлектрических характеристик исследуемых фотодиодов. Показано, что большие флюенсы нейтронного облучения облегчают процесс образования комплексов в межслойном промежутке слоистого селенида индия, вследствие чего несколько ухудшаются фотоэлектрические параметры фотодиодов.*

### Введение

Разработка и изготовление радиационно-стойких фотоприемников на основе слоистых соединений для ближней ИК-области спектра представляют определенный научно-практический интерес. Учитывая это, в данной работе исследовано влияние имитирующих факторов ядерного взрыва и протонного облучения на фотоэлектрические

свойства фотодиодов на основе селенида индия, охлаждаемого термоэлектрическим охладителем (ТЭО).

### Экспериментальные исследования

Исследуемые фотоприемники с ТЭО были подвергнуты следующим ионизирующим излучениям: на воздействие поражающих факторов ядерного взрыва с уровнем нейтронов с энергией