

УДК 621.3911:519.28

Т.Н. РОЗЗУВАЙЛО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ CdZnTe ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ ФОТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

*Предложен новый метод определения функциональной пригодности кристаллов CdZnTe для применения в радиоэлектронной аппаратуре на основе метода сканирующей фотодиэлектрической спектроскопии. Критериями для определения функциональной пригодности кристалла выбраны времена жизни носителей заряда, которые рассчитываются на основе информации о дефектно-примесной структуре кристалла. Эта информация получена применением метода сканирующей фотодиэлектрической спектроскопии. Приведены результаты в виде графических зависимостей и таблиц. Выполнен анализ полученных данных. Показано, что эти данные согласуются с данными, полученными ранее с помощью других методов.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый кристалл, дефект, сканирующая фотодиэлектрическая спектроскопия, время жизни носителей заряда.

**Введение**

Перспективным полупроводниковым материалом для изготовления детекторов ионизирующих излучений с высокими эффективностью регистрации и разрешением по энергии, даже при комнатных температурах, является CdZnTe. Этот материал имеет высокую плотность и широкую запрещенную зону.

Главным преимуществом CdZnTe-детекторов, по-сравнению с кремнием, является лучшие транспортные свойства при относительно слабых электрических полях.

Некоторые важные параметры для детекторных свойств материалов CdZnTe и Si приведены в сравнительной таблице 1 согласно литературным данным [1-3].

Таблица 1  
Сравнительные параметры материалов CdZnTe и Si

Материал	Среднее время жизни $\tau$ , с		$\mu\tau$ , см <sup>2</sup> /В	
	e	p	e	p
CdZnTe	$8 \cdot 10^{-7} - 9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8} - 1,2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-4} - 9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-5}$
Si	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,72	0,84

В последние годы CdZnTe-детекторы также нашли применение в медицинской диагностике, в ядерной медицине, включая позитронно эмиссионную томографию [3].

Важные преимущества CdZnTe-детекторов, позволяющих применить их в ядерной медицине: малые размеры, высокая чувствительность, возмож-

ность работы при комнатной температуре. Это позволяет использовать одноэлементные CdZnTe-детекторы для зондирования желудочной желчи, для диагностики ранних стадий почечной недостаточности, для анализа кровотока в коронарных артериях и т. д.

Успехи в производстве CdZnTe, вместе с успехами в технологии предварительных усилителей, в компьютерной обработке данных привели к возможности создания крупных интроскопических матриц на основе CdZnTe-детекторов. Эти матрицы используют при диагностике раковых заболеваний, для создания грудных рентгеновских систем, в костной денситометрии, в томографии.

**1. Параметры, влияющие на выбор полупроводникового кристалла используемого при построении детекторов ионизирующего излучения**

Важную роль при выборе полупроводникового материала для построения детекторов ионизирующего излучения играют такие параметры как подвижность ( $\mu$ ) и среднее время жизни носителей заряда ( $\tau$ ) дырок (e) и электронов (h). Качество детектора характеризуется параметром эффективности сбора заряда образующегося в полупроводнике под действием  $\gamma$ -излучения. Для количественного описания процесса сбора заряда обычно используется произведение  $\mu\tau$ . Известные параметры переноса позволяют рассчитать функцию отклика детектора. При расчете эффективности сбора заряда  $\eta(z)$ , соответствующей заданной глубине взаимодействия  $\gamma$ -кванта с веществом детектора, для планарных де-

текторов, необходимо использовать уравнение Хетта, учитывающее вклад электронов и дырок

$$\eta(z) = \frac{\mu_c \cdot \tau_c \cdot V}{d^2} \cdot (1 - e^{-\frac{(d-z)d}{\mu_c \cdot \tau_c \cdot V}}) + \frac{\mu_h \cdot \tau_h \cdot V}{d^2} \cdot (1 - e^{-\frac{-zd}{\mu_h \cdot \tau_h \cdot V}}), \quad (1)$$

где  $z$  – отсчитывается от отрицательного контакта до точки образования неравновесного заряда;

$V$  – напряжение смещения.

Как видно из формулы, эффективность сбора заряда тем больше, чем выше значения  $\mu$  и  $\tau$  для обоих видов носителей заряда.

Подвижность носителей заряда ( $\mu$ ) зависит от ряда факторов, важнейшим из которых является температура. Зависимость  $\mu$  от температуры определяется механизмом рассеяния носителей. Поскольку с повышением температуры увеличивается интенсивность колебания атомов кристаллической решетки, то возрастает и число столкновений в единицу времени, следовательно, наблюдается падение подвижности носителей.

Время жизни электронов является величиной, обратной вероятности встречи электрона с дыркой, которая равна  $g \cdot \rho$ , где  $g$  – коэффициент рекомбинации, определяемый структурой кристаллической решетки полупроводника, а время жизни дырки – величина, обратная вероятности встречи с электроном. Вероятность такой встречи практически незначительна. В реальных структурах рекомбинация происходит по схеме “зона - ловушка - зона”. Ловушками называются разрешенные энергетические уровни, возникающие за счет дефектов кристаллической структуры. Если  $M$  – концентрация ловушек, то  $M[1-P(E_i)]$  – концентрация свободных ловушек, где  $P(E_i)$  – вероятность заполнения разрешенных уровней, то есть в ловушке. Вероятность  $P(E_i)$  зависит от положения уровня Ферми и характеризуется функцией Ферми-Дирака.

$$P(E_i) = \frac{1}{\exp\left(-\frac{E_i - E_F}{k \cdot T}\right) + 1}, \quad (2)$$

где  $E_F$  – уровень Ферми;

$k$  – постоянная Больцмана,  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ·К<sup>-1</sup>;

$T$  – абсолютная температура, 293°К или 20°С;

$E$  – разрешенные уровни.

$$\tau_{n_i} = \frac{1}{\gamma \cdot M \cdot [1 - P(E_i)]}, \quad (3)$$

$$\tau_{p_i} = \frac{1}{\gamma \cdot M \cdot P(E_i)}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент рекомбинации электронов и дырок. Обычно значение этого параметра невелико и составляет  $10^{-5}$  [4].

Уравнения (3) и (4) позволяют сделать вывод о

причинах, влияющих на время жизни неравновесных носителей заряда:

1) во-первых, время жизни зависит от концентрации ловушек  $M$ . Чем больше дефектов в кристаллической структуре полупроводника, тем меньше время жизни;

2) во-вторых, время жизни зависит от концентрации примесей. Чем больше содержится примесей, тем дальше от середины запрещенной зоны расположен уровень Ферми.

Поэтому целью данного исследования является определение примесного и дефектного составов образца кристалла CdZnTe и расчет на основе полученных данных времени жизни носителей заряда.

## 2. Метод сканирующей фотодиэлектрической спектроскопии для определения дефектно-примесной структуры полупроводникового кристалла

Определить дефектно-примесную структуру полупроводника возможно с помощью метода сканирующей фотодиэлектрической спектроскопии (СФДС) [5]. Необходимо подчеркнуть простоту измерений этого метода, так как для их выполнения не требуется предварительно поляризовать образец или изменять его температуру в широких пределах.

Суть метода заключается в определении энергетических уровней, находящихся в исследуемом полупроводниковом кристалле. Для этого применяют основную монохроматическую подсветку и дополнительную (светодиод).

Монохроматическое излучение получают с помощью монохроматора – спектрального оптико-механического прибора, предназначенного для выделения монохроматического излучения. Возможность сканирования спектра (выбора нужного спектрального диапазона) обеспечивается путем поворота диспергирующего элемента вручную либо с помощью специального механизма.

Конденсор – линзовая, зеркальная или зеркально-линзовая оптическая система, собирающая лучи от источника света и направляющая их на рассматриваемый или проецируемый предмет.

Сканирующим параметром измерений является длина волны, которая изменяется при повороте диспергирующего элемента монохроматора (405 – 1287,9 нм).

Структурная схема информационно-измерительной системы реализующей метод СФДС имеет вид, представленный на рис. 1.

Метод СФДС осуществляется при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении с помощью установки, блок-схема которой изображе-

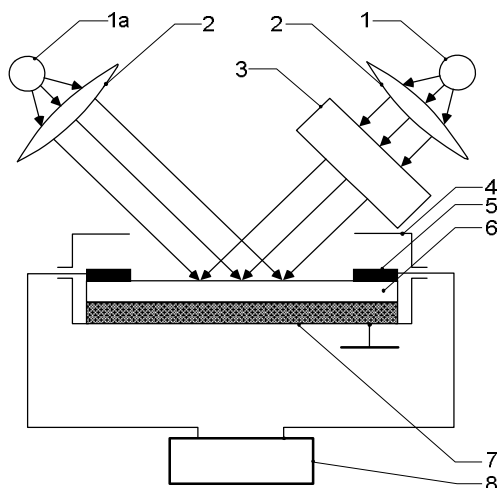


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки метода СФДС с применением дополнительной подсветки:

- 1 – источник света (лампа); 1а – дополнительный источник света (светодиод); 2 – конденсор;  
3 – монохроматор ДМР-4; 4 – электрический экран;  
5 – электроды; 6 – образец; 7 – изолятор;  
8 – прецизионный измеритель

на на рис.1. При этом свет от источника 1 проходит последовательно через конденсор 2 и монохроматор 3, падая на свободную от электродов 5 поверхность образца 6. Свет от второго источника также проходит через конденсор 2 и падает на свободную от электродов поверхность образца. Образец находится в электрическом контакте с электродами, соединенными с высокочувствительным измерителем RLC Good Will LCR-819 8. Экран 4 обеспечивает защиту сигнала измерений от внешних помех. Изолятор 7 обеспечивает электрическую изоляцию образца и электродов от экрана. Для определения энергетических центров выполняют следующие операции:

- образец 6 помещают в изолятор 7;
- на образце размещают электроды 5 по планарной схеме;
- устанавливают на монохроматоре 3 длины волны света из области нечувствительности образца;
- включают источник света 1 и мост переменного тока 8;
- определяют темновые значения емкости и коэффициента диэлектрических потерь;
- включают источник белого излучения 1а, интенсивность которого вблизи образца такая же, как интенсивность монохроматического света;
- плавно изменяют длину волны с помощью монохроматора в сторону области фоточувствительности, фиксируют массив значений  $\lambda$  света и массивы соответствующих значений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь во всей области фоточувствительности образца;

- строят зависимость в виде  $\text{tg}(C)$ ;
- определяют значения длины волны  $\lambda$ , которые ограничивают линейные участки зависимости;
- используя эти значения, рассчитывают энергетическое положение уровней.

В процессе измерений получают два массива данных: измеренные значения емкости кристалла и тангенса угла диэлектрических потерь ячейки с кристаллом. Для получения корректной численной информации о полученных массивах измерения проводятся три раза. Полученные данные подвергаются статистической обработке. Находятся математические ожидания для массивов значений  $C$  и  $\text{tg}\delta$

Графические зависимости  $C$  и  $\text{tg}\delta$  от длины волны ( $\lambda$ ) приведены на рис. 2-3.

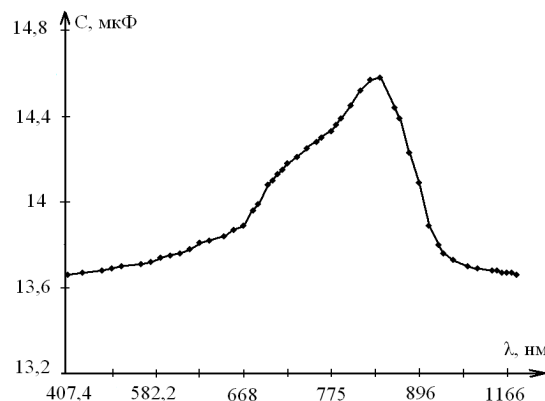


Рис. 2. Зависимость емкости измерительной ячейки с кристаллом от длины волны

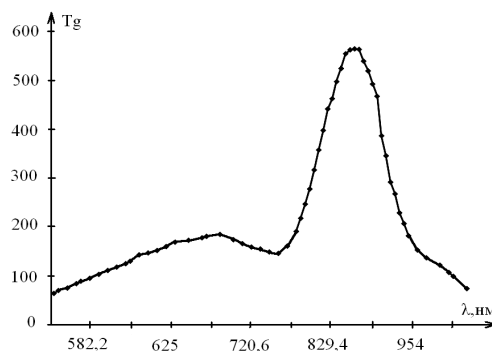


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь измерительной ячейки с кристаллом от длины волны

Более информативными являются эти распределения значений диэлектрических постоянных кристаллов при представлении их в комплексной плоскости, то есть в виде зависимости  $\text{tg}(C)$  (рис. 4).

При таком способе представления данных можно выделить отдельные участки зависимости. Критерием выбора границы участка служит достижение локального экстремума производной второго порядка зависимости  $\text{tg}''(C)$ , рассчитанного с применением численных методов [6] по формуле

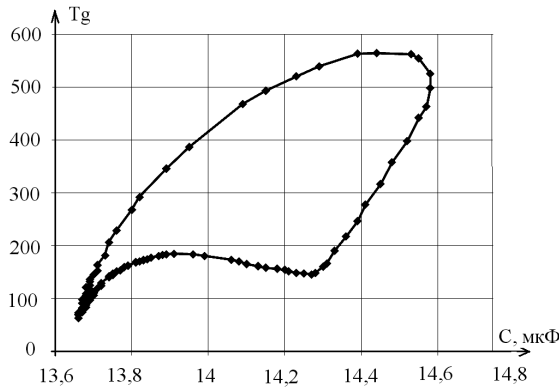


Рис. 4. Зависимость tg(C) при изменяющейся длине волны λ

$$tg'' = \frac{tg(i+1) - 2 \cdot tg(i) + tg(i-1)}{h^2}, \quad (5)$$

где tg – значения тангенса на i-м шаге;  
i – номер шага;  
h – шаг по оси x (C – емкость).

После нахождения массива вторых производных определяем локальные экстремумы найденных значений. Проводится построение графика, используя только полученные точки экстремумов.

Результат приведен на рис. 5.

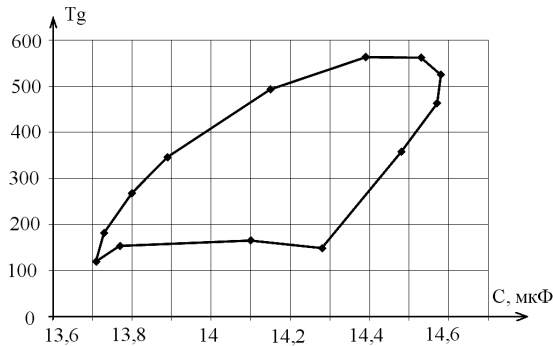


Рис. 5. Зависимость tg(C) после обработки

На рис. 5 видно отдельные границы полученных участков.

Граница каждого участка соответствует уровню залегания дефектов определенного типа. Состояния каждого сорта обладают своей глубиной залегания  $E_i$  по отношению к  $E_v$  (речь идет об акцепторных состояниях).

Глубину залегания локализованного состояния (дефекта) в ЗЗ принято [5] указывать по-разному в зависимости от его природы. Так, глубину залегания донорных состояний указывают относительно дна зоны проводимости, а акцепторных состояний – относительно потолка валентной зоны. Указанные выше границы  $\lambda_i$  (отсчет по монохроматору) участков зависимости  $tg''(C)$  – значения длины волны фотонов, вызывающие заброс электрона из i-го локализованного состояния на состояние в зоне проводимости вблизи ее дна. Поэтому, выраженная в эВ, глубина залегания локализованных состояний выражается соотношением

$$E_i = E_g - h \cdot c / \lambda_i,$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны, равная 1,609 эВ для исследованных кристаллов  $Cd_{0.90}Zn_{0.10}Te$ ;  
h – постоянная Планка 4,14 эВ;  
c – скорость света;  $\lambda_i$  – длина волны в нм.

В таблице 2 приведены рассчитанные значения энергий локализованных состояний в кристалле, а также результаты, полученные с применением других методов.

Таблица 2

Значения энергий локализованных состояний в кристалле

Метод СФДС		Другие методы [5], [7]		
№ участка	$\lambda_i$ , нм	Энергия, эВ	Энергия, эВ	Возможная природа [5], [7]
1	954	$E_v+0,31$	$E_v+0,32$	Комплекс $V_{Cd}$
2	942	$E_v+0,29$	$E_v+0,32$	Комплекс $V_{Cd}$
3	923,6	$E_v+0,26$	$E_v+0,25$	Атомы C, Si
4	910,8	$E_v+0,24$	$E_v+0,25$	Атомы C, Si
5	891,6	$E_v+0,21$	$E_v+0,19-0,22$	Комплекс $V_{Te}$
6	872,4	$E_v+0,18$	$E_v+0,19-0,22$	Комплекс $V_{Te}$
7	853,8	$E_v+0,15$	$E_v+0,10-0,16$	Комплекс примесь- $V_{Cd}$ ; А-центр; примесь в узлах Cd
8	835,5	$E_v+0,13$	$E_v+0,10-0,16$	
9	823,3	$E_v+0,10$	$E_v+0,10-0,16$	
10	805	$E_v+0,07$		
11	757	$E_c-0,15$	$E_c-0,17$	Примесь C
12	603	$E_c-0,45$	$E_c-0,64$	Связанный Zn
13	558,3	$E_c-0,61$	$E_c-0,64$	Связанный Zn

Имея информацию о дефектно-примесной структуре полупроводника, представляется возможным определить время жизни носителей заряда. В данном образце кристалла  $CdZnTe$  найдено 13 видов дефектов, образец имеет объем  $700 \text{ мм}^3$  ( $5 \times 10 \times 14$ ). Следовательно, концентрация дефектов (количество дефектов/объем кристалла) составляет  $13/700 = 1,86 \text{ мм}^{-3}$ .

По формуле 2 рассчитываем вероятность заполнения разрешенных уровней (см. табл. 2, столбец 3) при  $E_F = 1,3$  эВ уровень Ферми [3]. Графическая зависимость вероятности от значений энергий разрешенных уровней представлена на рис. 6.

По формулам (3), (4) рассчитываем значения времени жизни носителей заряда в зависимости от вероятности  $P(E_i)$ .

Находим среднее значение для  $\tau_n$  и  $\tau_p$ . Получаем  $2,79 \cdot 10^{-6}$  с для электронов и  $6,13 \cdot 10^{-9}$  с для дырок. Видно, что эти данные хорошо согласуются с данными из таблицы 1.

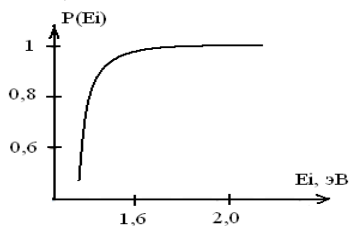


Рис. 6. Графическая зависимость вероятности заполнения разрешенных уровней от значений энергий разрешенных уровней

### Заключение

Выбор кристалла для построения того или иного электронного устройства является очень важной задачей, поскольку от этого во многом зависит дальнейшее функционирование прибора. В результате данного исследования на основе данных, полученных с помощью метода СФДС, были определены такие важные характеристики полупроводникового кристалла как времена жизни носителей заряда, которые являются критерием определения функциональной пригодности кристалла. В итоге имеем систему из измерительной установки и вычислительно-

го аппарата, с помощью которой можно принять решение о применении кристалла в РЭА.

### Литература

1. Козлова, О.Г. *Рост и морфология кристаллов [Текст]: учеб. издание / О.Г. Козлова.* – М.: Изд-во Московского Университета, 1972. – 304 с.
2. Урусов, В.С. *Геохимия твердого тела [Текст]: учеб. издание / В.С. Урусов, В.Л. Таусон, В.В. Акимов.* – М.: Изд-во ГЕОС, 1997. – 272 с.
3. *Телурид кадмію: домішкovo-дефектні стани та детекторні властивості [Текст] / Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, Е.В. Корбут, М.М. Борисюк.* – К.: «Іван Федоров», 2000. – 346 с.
4. Бочаров, Е.И. *Электрофизические свойства полупроводников [Электронный ресурс] / Е.И. Бочаров, Ю.М. Першин.* – Режим доступа: <http://dvo.sut.ru/libr/eqp/i001eqp1/1.htm>. – 01.09.2012 г.
5. *Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodielectric spectroscopy [Text] / V.K. Komar, V.P. Migal, O.N. Chugai, V.M. Puzikov.* // *Applied Physics Letters.* – 2002. – V. 81. – P. 4195 – 4197.
6. Михайленко, С.В. *Численные методы по лабораторному практикуму [Текст]: учеб. издание / С.В. Михайленко, Л.И. Черноштан.* – Х.: «ХАИ», 1984. – 67 с.
7. Schlesinger, T.E. *Mater. Sci. and Engineering [Text] / T.E. Schlesinger, J.E. Toney, E.Y. Lee.* // *Applied Physics Letters.* – 2001. – V. 32. – P. 103 – 104.

Поступила в редакцию 01.09.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., с.н.с отдела Дистанционного зондирования Земли Р.Э. Пашенко, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова ИРЭ НАН Украины, Харьков.

### ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ КРИСТАЛІВ CdZnTe ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ НА ОСНОВІ МЕТОДУ СКАНУЮЧОЇ ФОТОДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

*Т.М. Роззувайло*

Запропоновано новий метод визначення функціональної придатності кристалів CdZnTe для застосування в радіоелектронній апаратурі на основі методу скануючої фотодіелектричної спектроскопії. Критеріями для визначення функціональної придатності кристала вибрано час життя носіїв заряду, які розраховуються на основі інформації про дефектно-домішкову структуру кристала. Ця інформація отримана застосуванням методу скануючої фотодіелектричної спектроскопії. Приведено результати, отримані за допомогою цього методу, у вигляді графічних залежностей і таблиць. Виконано аналіз отриманих даних. Показано, що ці дані добре узгоджуються з даними, отриманими раніше за допомогою інших методів.

**Ключові слова:** напівпровідниковий кристал, дефект, скануюча фотодіелектрична спектроскопія, час життя носіїв заряду.

### DETERMINATION OF THE FUNCTIONAL SUITABILITY OF CRYSTALS OF CdZnTe FOR APPLICATION IN RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT ON THE BASIS OF THE METHOD OF SCANNING PHOTODIELECTRIC SPECTROSCOPY

*Т.М. Rozzuvaylo*

The new method of determination of the functional suitability of crystals of CdZnTe for application in radio-electronic equipment on the basis of a method of scanning photodielectric spectroscopy was offered. As criteria for determination of the functional suitability of a crystal were selected lifetimes of charge carriers. They are calculated on the basis of information on the defective structure of crystal. This information was obtained by means of a method of scanning photodielectric spectroscopy. Results are given in a type of graphic dependences and tables. These data will well be coordinated dataful received earlier by means of other methods.

**Key words:** semiconductor crystal, defect, scanning photodielectric spectroscopy, the lifetime of the charge carriers.

**Роззувайло Татьяна Николаевна** – магистрант кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, Україна, e-mail: novohatskaya-t@mail.ru.