

А. И. КОНДРИК

Украина, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ДЕТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ДОЗЫ

Проведен анализ и указаны возможные причины изменений характеристик глубоких уровней в высокоомном $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ после γ -облучения и в течение пострadiaционной релаксации. Исследована зависимость свойств плоскопараллельного детектора на основе $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ от концентрации и уровня энергии глубокого донора, а также от степени легирования алюминием. Определены условия деградации регистрирующих свойств детектора на начальном этапе его эксплуатации под воздействием агрессивной радиационной среды.

Ключевые слова: CdZnTe , гамма-облучение, детекторы, моделирование, глубокие уровни.

Высокоомные полупроводники CdZnTe широко применяются в качестве материалов для детекторов γ - и рентгеновского излучения. В процессе эксплуатации эти детекторные материалы подвергаются интенсивному воздействию излучения, в результате чего в решетке возникают радиационные дефекты, а в запрещенной зоне появляются мелкие и глубокие уровни, действующие как центры захвата свободных носителей заряда. Ионизирующие излучения влияют на электрические и транспортные свойства, например на удельное сопротивление ρ и время жизни τ неравновесных носителей заряда, а также ухудшают энергетическое разрешение детекторов, вызывая сдвиг спектральных пиков, что может привести к полной потере эффективности сбора зарядов. Исследования влияния дефектов на регистрирующие свойства детекторов, а также поведения дефектов под воздействием агрессивной радиационной среды являются очень важными для улучшения детекторных характеристик. При этом значительную трудность представляет точное измерение параметров дефектов: концентрации N_T , сечения захвата σ , положения уровня их энергии в запрещенной зоне E_a . Основной причиной указанной проблемы считается высокое удельное сопротивление, которое для $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ достигает 10^{10} Ом·см.

В настоящее время для измерения характеристик уровней дефектов в CdZnTe используются различные методики, например термостимулированная токовая спектроскопия TSC (thermally stimulated current spectroscopy), термоэлектрическая эмиссионная спектроскопия TEES (thermoelectric emission spectroscopy). Широко применяется такая разновидность нестационарной спектроскопии глубоких уровней, как фотостимулированная токовая нестационарная спек-

троскопия PICTS (photoinduced current transient spectroscopy). Однако проведенные в [1–3] исследования электрофизических и транспортных свойств CdZnTe показали, что удельное сопротивление и время жизни, вычисленные на основе измеренных методом PICTS [4–6] концентраций N_T и уровней энергии E_a , в некоторых случаях отличаются на два-три порядка от известных величин.

Измерение N_T , σ , E_a осуществляется с помощью методик, основанных на принудительном заполнении энергетических уровней электронами и дырками с последующей их эмиссией в соответствующие зоны. Измерение тока носителей заряда, эмитировавших с уровней в широком интервале температур, позволяет получить спектры с явно выраженными пиками при некоторых температурах, соответствующих определенным положениям уровня энергии. Высота пиков и их ширина определяются, соответственно, концентрацией уровней и сечением захвата носителей заряда. Перекрытие этих пиков может не только заметно исказить истинные величины N_T , E_a и σ , но и привести к неправильной идентификации уровней, регистрации несуществующих или потере реальных уровней дефектов. Интересная попытка решения данной проблемы предложена в [7, 8], где для интерпретации спектров TSC и определения характеристик уровней дефектов использован метод SIMPA (simultaneous multiple peak analysis), в котором осуществляется подгонка теоретической кривой, состоящей из суммы отдельных пиков уровней, под экспериментальные спектры. Определенные таким образом N_T , E_a и σ для каждого уровня хорошо коррелируют с данными, полученными с помощью других методик [8].

Таким образом, очевидно, что корректное измерение параметров уровней дефектов, влияющих на характеристики детекторов на основе CdZnTe, является весьма затруднительным. По этой причине для исследования изменений электрофизических и детекторных свойств CdZnTe под воздействием γ -излучения необходимо кроме экспериментальных результатов дополнительно использовать численное моделирование.

Целью настоящей работы было изучение изменения удельного сопротивления $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ и эффективности сбора зарядов детекторов на его основе, работающих под воздействием малой дозы γ -излучения. Исследование проводилось методом компьютерного моделирования, в котором в качестве исходных служили данные, полученные в [9], где использовались TSC-спектры, обработанные методом SIMPA.

Исходные данные и методы расчета

В таблице представлены значения концентрации N_T , положение уровня энергии E_a и сечения захвата технологических и радиационных дефектов $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, приведенные в [9]. Уровни энергии акцепторов отсчитываются от валентной зоны, доноров — от зоны проводимости. Методом TSC были измерены характеристики девяти дефектов, десятый же, который является глубоким донором, был зарегистрирован путем записи спектра темнового тока без фотовозбуждения. Поскольку таким методом можно измерить лишь положение уровня энергии, но не концентрацию и сечение захвата, для глубокого донора E_{dd} сечение захвата было установлено равным $5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, что по порядку вели-

чины соответствует сечениям захвата соседних уровней. Это дало значение времени жизни неравновесных носителей заряда примерно 10^{-6} с . Концентрация N_{dd} донора глубокого уровня E_{dd} варьировалась в широких пределах, что позволило исследовать момент перехода от низкоомного к полужолирующему состоянию, в котором работают современные детекторы.

При вычислении ρ сначала численно решалось уравнение электронейтральности и определялись концентрации свободных электронов (n) и дырок (p) с точностью не хуже 10^{-7} . В уравнение были включены концентрации и уровни энергии 10 дефектов, представленные в таблице, а также легирующего Al, который является мелким донором. Затем рассчитывалась подвижность μ_n электронов на основе классической теории рассеяния с учетом традиционных механизмов рассеяния на примесях и фононах (подвижность дырок μ_p принималась равной $70 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$). Удельное сопротивление рассчитывалось по формуле

$$\rho = (en\mu_n + ep\mu_p)^{-1},$$

где e — заряд электрона.

Детектор предполагался плоскопараллельным с расстоянием 5 мм между электродами, напряженность электрического поля — 1000 В/см . Время жизни носителей заряда, дрейфующих в межэлектродном пространстве детектора, определялось согласно теории Шокли — Рида — Холла. Полученные значения подвижности, времени жизни носителей заряда и параметры детектора подставлялись в формулу Хегга [10], и таким образом определялась эффективность сбора зарядов.

Параметры уровней дефектов в $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, полученные методом TSC до облучения образца, сразу после γ -облучения дозой $2,7 \text{ кГр}$ и через месяц [9]

Уровень	Энергия E_a , эВ			Концентрация N_T , см^{-3}			Сечение захвата σ , см^2		
	до облучения	после облучения	месяц спустя	до облучения	после облучения	месяц спустя	до облучения	после облучения	месяц спустя
$E_1^-(\text{Ag, Au})$	0,047	—	0,051	$3 \cdot 10^{14}$	—	$6,6 \cdot 10^{14}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$	—	$9,44 \cdot 10^{-14}$
$E_2^+(\text{V}_{\text{Cd}})$	0,094	0,102	0,099	$3,6 \cdot 10^{14}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^{14}$	$3,63 \cdot 10^{-19}$	$3,72 \cdot 10^{-19}$	$3,75 \cdot 10^{-19}$
$E_3^-(\text{A})$	0,127	0,129	0,128	$1,5 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{14}$	$1,08 \cdot 10^{-18}$	$8,8 \cdot 10^{-19}$	$9,77 \cdot 10^{-19}$
$E_4^+(\text{Te}_{\text{Cd}})$	0,185	—	—	$8,1 \cdot 10^{13}$	—	—	$4,06 \cdot 10^{-18}$	—	—
$E_5(\text{C})$	0,236	0,232	0,234	$4,2 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{14}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$2,18 \cdot 10^{-18}$	$1,00 \cdot 10^{-18}$	$9,56 \cdot 10^{-19}$
$E_6^-(\text{Cu})$	0,291	0,309	0,312	$4,1 \cdot 10^{14}$	$5,5 \cdot 10^{14}$	$5,8 \cdot 10^{14}$	$1,71 \cdot 10^{-18}$	$1,91 \cdot 10^{-18}$	$1,82 \cdot 10^{-18}$
$E_7^{2+}(\text{Te}_{\text{Cd}})$	0,371	0,368	0,372	$4,6 \cdot 10^{14}$	$3,5 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{14}$	$6,66 \cdot 10^{-18}$	$7,77 \cdot 10^{-18}$	$7,61 \cdot 10^{-18}$
$E_8^{2-}(\text{V}_{\text{Cd}})$	0,507	0,488	0,487	$7,2 \cdot 10^{14}$	$9,5 \cdot 10^{14}$	$8,8 \cdot 10^{14}$	$2,83 \cdot 10^{-18}$	$2,74 \cdot 10^{-18}$	$2,99 \cdot 10^{-18}$
$E_9^-(\text{V}_{\text{Zn}})$	0,620	0,621	0,624	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,0 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{14}$	$6,8 \cdot 10^{-17}$	$9,16 \cdot 10^{-18}$	$9,68 \cdot 10^{-18}$
E_{dd}^+	0,554	0,792	0,782	$1 \cdot 10^{14} - 4,9 \cdot 10^{15}$			$5,0 \cdot 10^{-18}$		

Анализ исходных данных, результаты и обсуждение

Из таблицы видно, что в ходе облучения и последующей выдержки образцов в течение месяца изменяются все параметры (N_T , E_a , σ) всех зарегистрированных дефектов. Такой результат весьма неожидан, поскольку даже в процессе γ -облучения, при котором выбиваются атомы из узлов решетки и увеличивается концентрация радиационных дефектов, не может изменяться концентрация (а также σ и E_a) всех дефектов. Тем более непонятно изменение N_T , σ и E_a всех дефектов в течение пострadiационной выдержки.

Тем не менее, можно предположить, что в ходе γ -облучения и последующей выдержки в результате различных диффузионных и релаксационных процессов изменяется зарядовое состояние локальных центров и комплексов дефектов. Это в свою очередь изменяет соотношение между концентрациями заряженных центров ионного остова и свободных носителей заряда, т. е. степень компенсации полупроводника. С другой стороны, в [11] на примере кремния было экспериментально показано, что измеренные значения концентрации электрически активных атомов легирующей примеси зависят от типа и концентрации исходных примесей. В этой работе также сделан вывод о том, что в зависимости от степени компенсации материала и условий эксперимента одни и те же примесные атомы с глубокими энергетическими уровнями могут внести в запрещенную зону полупроводника различные величины этих уровней, которые соответствуют определенным состояниям в кристаллической решетке. По-видимому, этим можно объяснить и рассматриваемые нами результаты из [9], свидетельствующие об изменениях параметров $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ в процессе и после облучения.

Таким образом, опираясь на исследования [9] и сделанные в [11] выводы, можно заключить, что в случае сильнокомпенсированного CdZnTe нарушаются условия локальной электронейтральности в решетке, изменяется потенциал вокруг дефекта и дефектная структура кристаллической решетки. При этом система находится в неравновесном состоянии, и воздействие температуры, давления, а также электрического поля атомов ионного остова изменяет электронную структуру дефектов и условия взаимодействия дефектов и свободных носителей заряда. По этой причине глубокие уровни дефектов решетки в этих условиях, в отличие от некомпенсированного полупроводника, не имеют фиксированных состояний, а постоянно перестраиваются под воздействием внешних факторов. При этом каждому квазиравновесному состоянию решетки соответствуют только определенные состояния дефектов и примесей (положение их в решетке, энергетические уровни). Так что

состояние дефектов, примесных атомов и соответствующие им энергетические уровни не являются фиксированными, а могут иметь различные значения в зависимости от степени компенсации материала и условий эксперимента [11].

Данные, представленные в таблице, получены путем обработки TSC-спектров, записанных в температурном интервале 25 — 310 К, где мелким уровням соответствовали низкотемпературные пики, а глубоким — пики при повышенной температуре вплоть до комнатной. Однако разным значениям температуры соответствует разная степень компенсации и, следовательно, разные квазиравновесные состояния. Детекторы γ -излучения на основе CdZnTe работают при комнатной температуре, т. е. в условиях, отличных от условий измерения N_T , E_a и σ для большинства уровней. Таким образом, очевидно, что метод TSC и другие современные методики не позволяют получить точные значения N_T , E_a , σ глубоких уровней при рабочих температурах детектора на основе сильнокомпенсированного CdZnTe . В связи с этим имеет смысл проводить исследование электрофизических и детекторных свойств CdZnTe:Al в широком интервале концентраций и энергий глубоких уровней дефектов, особенно тех, которые заметно влияют на захват носителей заряда в материале детектора.

Легирование алюминием — это традиционное введение мелкого донора для компенсации мелких акцепторов и частичной компенсации глубоких акцепторов, в роли которых выступают двукратно заряженные вакансии кадмия V_{Cd}^{2-} (уровень E_8 , см. таблицу) и однократно заряженные вакансии цинка V_{Zn}^- (уровень E_9). Последние активно участвуют в процессах захвата носителей заряда, дрейфующих в межэлектродном пространстве, поэтому сильно влияют на регистрирующие свойства детектора. После компенсации мелких акцепторов и вакансий кадмия V_{Cd}^{2-} концентрация свободных носителей заряда определяется соотношением между концентрациями глубокого акцептора V_{Zn}^- и глубокого донора, обозначенного в таблице как E_{dd}^+ , который и обеспечивает высокоомные свойства материала ($\rho \approx 10^{10}$ Ом·см). Предварительные расчеты показали, что для рассматриваемого случая оптимальной является концентрация алюминия $N_{\text{Al}} = 8 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$.

Было проведено исследование зависимости удельного сопротивления ρ исходного материала от концентрации N_{dd} и энергии глубокого донора. Полученные трехмерные зависимости приведены на рис. 1 для двух концентраций вакансий цинка (E_{dd} отсчитывается от валентной зоны).

Из рис. 1 видно, что наилучшее для работы детектора удельное сопротивление $\rho > 10^{10}$ Ом·см находится в области энергии глубокого донора $E_{dd} \approx 0,8$ эВ, отсчитываемой от валентной зоны. Ширина запрещенной зоны $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ при комнатной температуре равна 1,57 эВ.

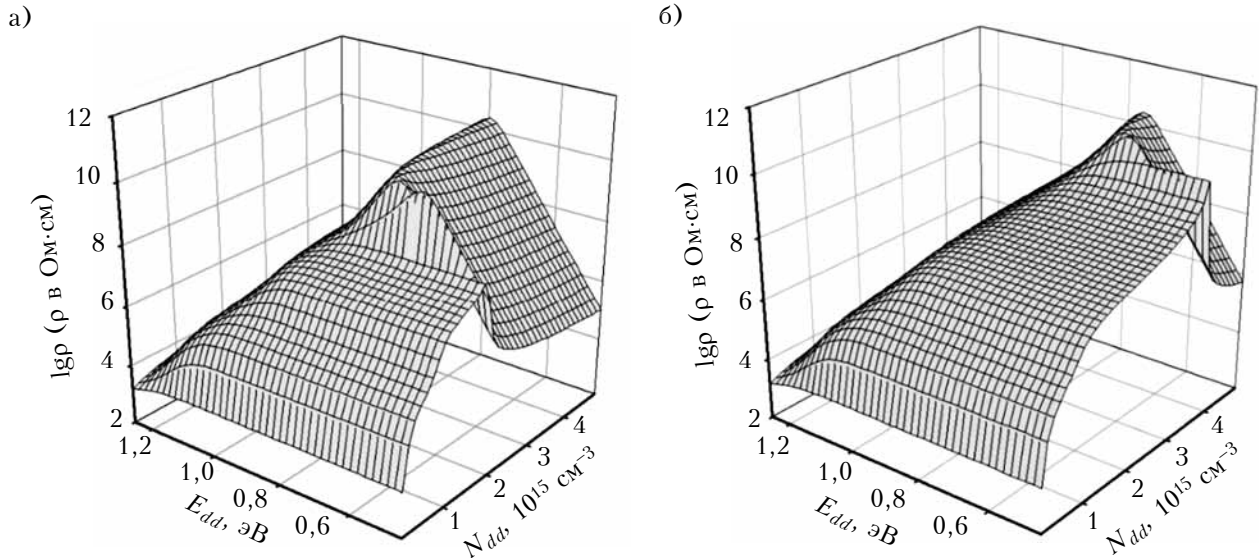


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления необлученного $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ от концентрации и энергии глубокого донора при концентрации V_{Zn} , равной $1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (а) и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (б) (параметры остальных дефектов приведены в таблице)

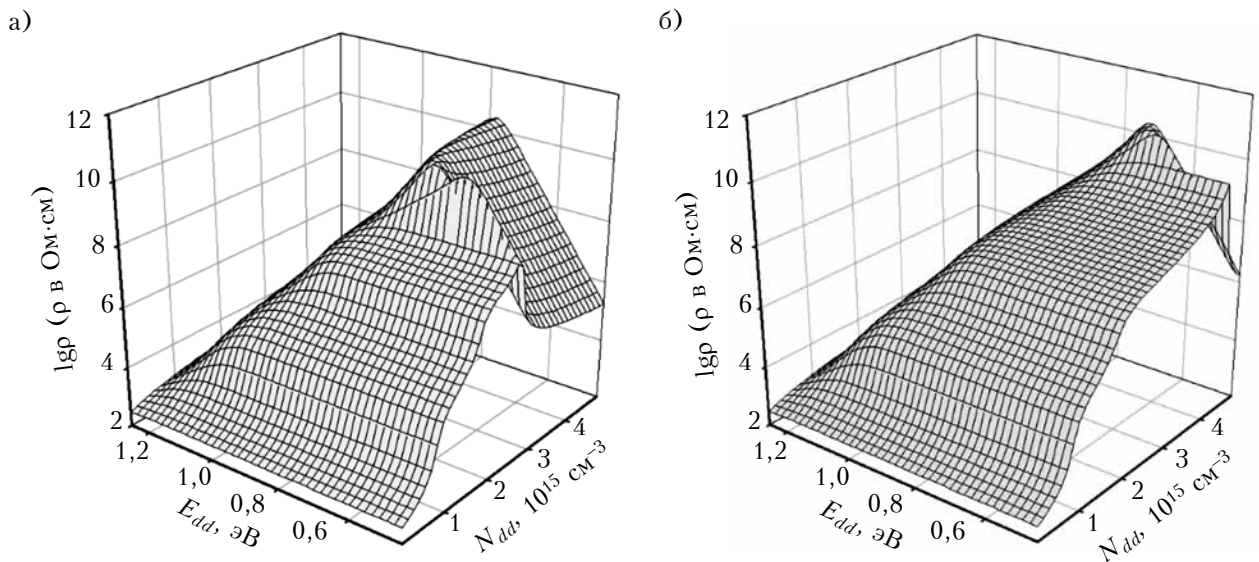


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$, облученного γ -квантами дозой 2,7 кГр, от концентрации и энергии глубокого донора при концентрации вакансий кадмия $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (а) и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (б) (параметры остальных дефектов приведены в таблице)

Относительно низкоомное плато (примерно $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) перед высокоомным пиком соответствует неполной компенсации двукратно заряженных вакансий кадмия. С увеличением концентрации V_{Zn} уменьшается высокоомная область, пригодная для работы детектора. Кроме того, с увеличением концентрации V_{Zn} изменяется уровень энергии глубокого донора, который необходим для достижения полуизолирующего состояния $\rho > 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, т. е. донор должен становиться более глубоким. Таким образом, в зависимости от конкретного состава материала существует некоторая критическая концентрация вакансий цинка, выше которой происходит неприемлемое снижение ρ на два-три порядка.

Детекторы на основе CdZnTe в процессе эксплуатации подвергаются γ -облучению, которое даже в малых дозах влияет на характеристики глубоких доноров и вакансий цинка, т. е. дефектов, наиболее сильно влияющих на ρ и захват носителей заряда. Из таблицы видно, что особенно заметно изменяется уровень энергии глубокого донора. На рис. 2 показаны зависимости удельного сопротивления облученного $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ от концентрации и энергии глубокого донора (для удобства сравнения эти зависимости рассчитаны в тех же диапазонах изменения N_{dd} и E_{dd} , что и на рис. 1).

Из сравнительного анализа приведенных на рис. 1 и рис. 2 данных можно заключить, что

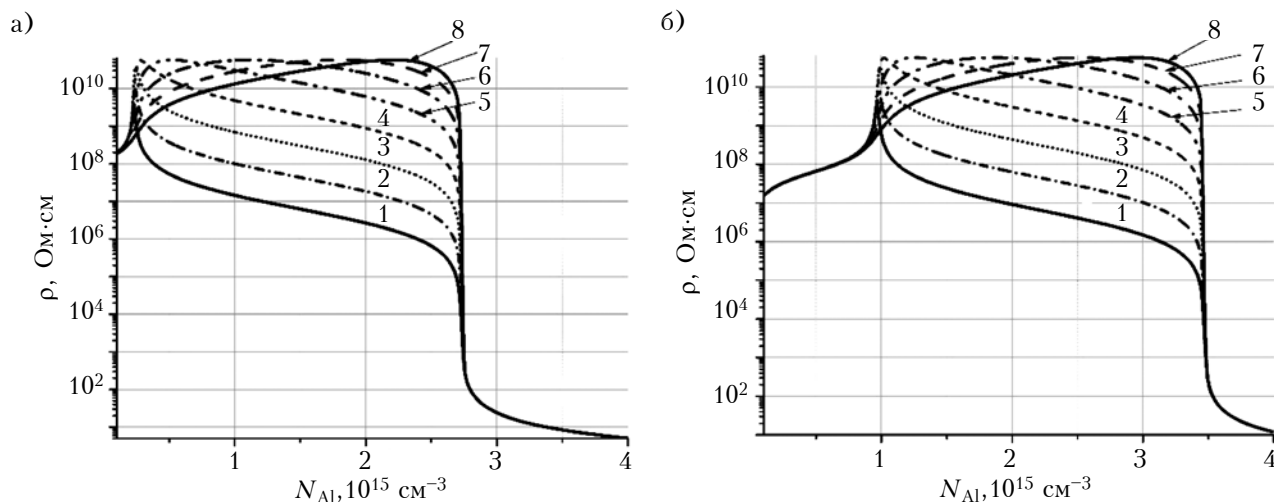


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ от концентрации легирующего Al в исходном материале (а) и после γ -облучения дозой 2,7 кГр (б) для разных уровней энергии E_{dd} , отсчитываемых от зоны проводимости (в эВ):

1 — 0,554; 2 — 0,604; 3 — 0,654; 4 — 0,704; 5 — 0,754; 6 — 0,792; 7 — 0,821; 8 — 0,842

даже малая доза γ -облучения приводит к уменьшению области высокоомного состояния, т. е. к началу процесса деградации удельного сопротивления материала. Такой вывод несколько противоречит результатам работы [9], авторы которой зафиксировали увеличение ρ после облучения. Однако увеличение или уменьшение ρ в каждом конкретном случае определяется соотношением между действительными концентрациями и уровнями энергии дефектов, точно измерить которые не представляется возможным для сильнокомпенсированного материала.

Для более точного анализа были рассчитаны зависимости удельного сопротивления $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ от концентрации алюминия до и после облучения для разных уровней энергии глубокого донора E_{dd} , представленные на рис. 3 (кривая 1 на рис. 3, а и кривая 6 на рис. 3, б рассчитаны для указанных значений E_{dd} , полученных путем измерений). Дефектный состав материала показан в таблице.

Из приведенных данных следует, что удельное сопротивление материала, так же как и в [9], после малой дозы γ -облучения образца увеличивается. Эти результаты согласуются также с результатами работы [12], где было зарегистрировано увеличение ρ на начальном этапе γ -облучения.

Как видно из рис. 3, графики зависимости $\rho(N_{\text{Al}})$ облученных образцов сдвигаются по сравнению с исходными в сторону больших концентраций алюминия, что согласуется с выводами работ [2, 3], где исследовалась деградация детекторных свойств $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ под воздействием рентгеновского облучения. Значит, если концентрация легирующего алюминия недостаточно велика, то в процессе эксплуатации можно получить преждевременное снижение ρ , приводя-

щее к увеличению токов утечки и уменьшению отношения сигнал/шум, что вызывает деградацию регистрирующей способности детектора. В [9] для необлученного образца была зафиксирована энергия глубокого донора $E_{dd}=0,554$ эВ и $\rho=7,5 \cdot 10^9$ Ом·см, а для облученного — $E_{dd}=0,792$ эВ и $\rho=5,6 \cdot 10^{10}$ Ом·см. Однако, судя по кривой 1 на рис. 3, а, при тех параметрах и составе дефектов исходного образца, при которых проводились измерения, почти невозможно получить его высокоомное состояние при любом уровне легирования за исключением очень узкой области при $N_{\text{Al}}=2,37 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, когда $\rho=2,6 \cdot 10^9$ Ом·см. При этом указанное высокоомное состояние сразу же деградирует в ходе облучения, что противоречит эксперименту, где ρ увеличивается. Причиной такого несоответствия результатов является невозможность точного измерения характеристик и состава дефектов CdZnTe с помощью современных методик, о чем говорилось выше. В связи с этим оперировать точными значениями концентрации и энергии дефектов нет смысла, достаточно лишь качественно рассмотреть динамику поведения радиационных дефектов.

В моделирующую программу в качестве исходных данных были введены экспериментально измеренные характеристики дефектов материала до и после облучения, приведенные в таблице. Вычислялись зависимости удельного сопротивления, а также эффективности η сбора зарядов, дрейфующих из середины межэлектродного пространства детектора, от концентрации легирующего алюминия.

Из приведенных на рис. 4, а результатов моделирования видно, что удельное сопротивление материала возрастает не только в процессе облучения, но и в течение последующего месяца. То же самое можно сказать и о сдвиге гра-

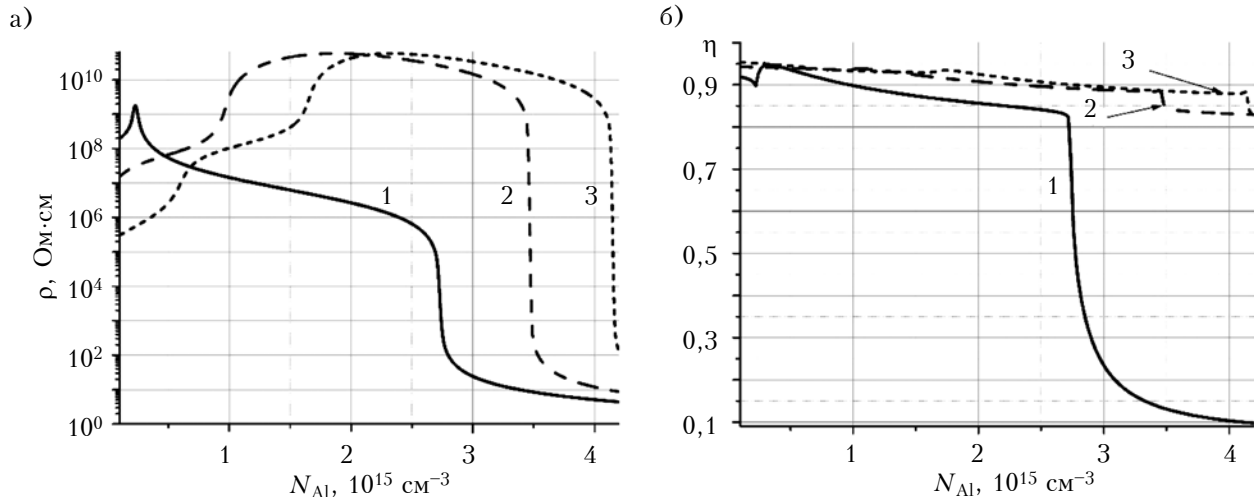


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления (а) и эффективности сбора зарядов (б) от концентрации легирующего алюминия в $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$:

1 — исходный образец; 2 — после γ -облучения дозой 2,7 кГр; 3 — через месяц после облучения

фиков зависимости $\rho(N_{\text{Al}})$ в сторону больших значений N_{Al} .

Эффективность сбора зарядов детектора на основе необлученного $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ коррелирует с его удельным сопротивлением: сохраняет высокие значения не только в высокоомной области ($\rho \approx 10^9$ Ом·см), но и в области значений $\rho \approx 10^6 - 10^7$ Ом·см, и значительно деградирует при резком падении ρ до низкоомных величин (кривая 1 на рис 4, б). Что касается облученного материала, в нем эффективность сбора зарядов сохраняется высокой во всей исследуемой области концентраций Al (кривые 2, 3), а заметное ее снижение (примерно до 0,4) происходит при значительно больших, чем показано на рисунке, концентрациях алюминия ($N_{\text{Al}} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$).

Таким образом, регистрирующие свойства детектора на основе $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ могут ухудшиться уже на начальной стадии его эксплуатации только лишь из-за снижения удельного сопротивления (из-за смещения кривой $\rho(N_{\text{Al}})$ вправо), что вызовет увеличение токов утечки и заметное ухудшение отношения сигнал/шум. Эффективность же сбора зарядов детектора, облученного малой дозой γ -квантов, даже несколько увеличивается по сравнению с необлученным.

Выводы

Таким образом, на основании анализа результатов проведенных исследований можно заключить следующее.

1. Точное измерение характеристик всех уровней дефектов в высокоомном и сильнокомпенсированном CdZnTe не представляется возможным с помощью современных методик, основанных на записи спектров в широком температурном интервале, поскольку при этом возникают различные квазиравновесные состояния, определяющие различные параметры уровней. Измерение же характеристик глубоких уровней, которые реально влияют на захват носителей заряда, осу-

ществляется при температурах, близких к рабочим температурам детектора, что делает возможным исследование качественных изменений свойств детектора, работающего под воздействием ионизирующего излучения.

2. На регистрирующие свойства детектора на основе $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ отрицательно влияет повышенная концентрация вакансий цинка, которая может возникнуть как на стадии изготовления, так и под воздействием γ -облучения в процессе эксплуатации.

3. При облучении детектора на основе $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ в процессе эксплуатации зависимость удельного сопротивления от концентрации легирующего алюминия N_{Al} смещается в сторону больших концентраций Al, т. е. происходит деградация его свойств. Это имеет место в случае малых значений N_{Al} , причем на начальном этапе облучения произойдет снижение только удельного сопротивления, а эффективность сбора зарядов может даже немного повыситься. При достаточно высоком уровне легирования на начальном этапе облучения происходит увеличение и удельного сопротивления материала, и эффективности сбора зарядов детектора на его основе.

Что касается дальнейших исследований, то поскольку современные детекторы работают в условиях облучения и тяжелыми частицами, представляет интерес изучение изменений свойств детектора на основе CdZnTe под влиянием бомбардировки нейтронами с целью сравнения полученных при этом результатов с выводами и результатами настоящего исследования, а также [2, 3].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кондрик А. И. Эффективность сбора зарядов в датчиках γ -излучений с различной конфигурацией электродов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 47–51.

2. Kondrik A. I. Effect of irradiation on properties of CdTe detectors // East European Journal of Physics. — 2014. — Vol. 1, N 1. — P. 47–52.
3. Kondrik A. I. Influence of radiation-induced defects on CdTe and CdZnTe detectors properties // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. — 2015. — Vol. 96, N 2. — P. 18–24.
4. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe // J. Appl. Phys. — 1998. — Vol. 83, N 4. — P. 2121–2126.
5. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ detectors // J. Appl. Phys. — 2009. — Vol. 106, P. 093713. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
6. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1996. — Vol. 380, N 1–2. — P. 117–120.
7. Pavlović M., Desnica U. V., Gladić J. Complete set of deep traps in semi-insulating GaAs // J. Appl. Phys. — 2000. — Vol. 88, N 8. — P. 4563. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1308072>
8. Pavlović M., Jakšić M., Zorc H., Medunić Z. Identification of deep trap levels from thermally stimulated current spectra of semi-insulating CdZnTe detector material // J. Appl. Phys. — 2008. — Vol. 104, N2. — P. 023525. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.2959354>
9. Ruihua Nan, Wanqi Jie, Gangqiang Zha et al. Irradiation-induced defects in $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ // Journal of Electronic Materials. — 2012. — Vol. 41, N 11. — P. 2044–2049. — <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2204-5>
10. Akutagawa W., Zanio K. Gamma response of semi-insulating material in the presence of trapping and detrapping // J. Appl. Phys. — 1969, Vol. 40, N 9. — P. 3838–3854. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1658281>
11. Садуллаев А. Б. Состояние примесных атомов с глубокими уровнями в полупроводниках в условиях сильной компенсации // Молодой ученый. — 2011. — Т. 1, № 12. — С. 48–50.
12. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe // Appl. Phys. Lett. — 2000. — Vol. 77, N 20. — P. 3212–3214. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1324980>

Дата поступления рукописи
в редакцию 06.10 2015 г.

О. І. КОНДРИК

Україна, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ДЕТЕКТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ ПІД ВПЛИВОМ ГАММА-ОПРОМІНЕННЯ МАЛОЇ ДОЗИ

Проведено аналіз та вказано можливі причини змін характеристик глибоких рівнів у високоомному $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ під час γ -опромінення та протягом пострадіаційної релаксації. Досліджено залежність властивостей плоскопаралельного детектора на основі $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ від концентрації та рівня енергії глибокого донора, а також від ступеня легування алюмінієм. Визначено умови деградації реєструвальних властивостей детектора на початковому етапі його експлуатації під впливом агресивного радіаційного середовища.

Ключові слова: CdZnTe, гамма-опромінення, детектори, моделювання, глибокі рівні.

DOI: 10.15222/TKEA2016.1.12
UDC 621.315.592.3

A. I. KONDRİK

Ukraine, NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

DETECTOR PROPERTIES OF $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ UNDER THE INFLUENCE OF LOW DOZE GAMMA IRRADIATION

Clarification of the influence of defects on detecting properties of CdZnTe detectors and understanding of the behavior of defects under the influence of aggressive radiation environment are very important to improve detector performance. The objective was to study the charges collection efficiency and the resistivity of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ detectors operating under the influence of low dose γ -radiation. The study was carried out by computer simulation, where initial data were provided by the experiment results of other researchers. The possible reason for the change of measured signatures of defect levels in high resistance $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ during gamma irradiation and 1 month later is the change in compensation degree of the material. The changes in the properties of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ detector have been researched depending on the concentration and energy level of the deep donor for different concentrations of deep acceptors, as well as on the degree of alloying with aluminum. The negative factor for registering properties of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ detector is increased concentration of zinc vacancies, which may arise at manufacturing stage and under influence of γ -irradiation

during operation. The degradation of properties of irradiated detector may occur due to the offset dependence of the resistivity on the aluminum dopant concentration $N(\text{Al})$ towards to higher concentrations of Al when the value of doping is not enough large. Only resistivity will be reduced and charge collection efficiency may increase. The increase in resistivity of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ and charges collection efficiency of the detector occur when there is a sufficiently high level of doping the material with aluminum.

Keywords: CdZnTe, gamma-irradiation, detectors, computer simulation, deep levels.

REFERENCES

1. Kondrik A. I. [Charges collection efficiency in gamma-ray detectors with different electrodes configuration]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no 4, pp. 47-51. (Rus)
2. Kondrik A. I. Effect of irradiation on properties of CdTe detectors. *East European Journal of Physics*, 2014, vol. 1, no 1, pp. 47-52.
3. Kondrik A. I. Influence of radiation-induced defects on CdTe and CdZnTe detectors properties. *Problems of Atomic Science and Technology, Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, 2015, vol. 96, no 2, pp. 18-24.
4. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe. *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 83, no 4, pp. 2121-2126.
5. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A., Cavallini A., Siffert P. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ detectors. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, pp. 093713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
6. Hofmann D.M., Stadler W., Christmann P., Meyer B.K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1996, vol. 380, no 1-2, pp. 117-120.
7. Pavlović M., Desnica U. V., Gladić J. Complete set of deep traps in semi-insulating GaAs. *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 88, no 8, pp. 4563. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1308072>
8. Pavlović M., Jakšić M., Zorc H., Medunić Z. Identification of deep trap levels from thermally stimulated current spectra of semi-insulating CdZnTe detector material. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 104, no 2, pp. 023525. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2959354>
9. Ruihua Nan, Wanqi Jie, Gangqiang Zha, Bei Wang, Yadong Xu, Hui Yu. Irradiation-induced defects in $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{Al}$. *Journal of Electronic Materials*, 2012, vol. 41, no 11, pp. 2044-2049. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2204-5>
10. Akutagawa W., Zanio K. Gamma response of semi-insulating material in the presence of trapping and detrapping. *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, no. 9, pp. 3838-3854. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1658281>
11. Sadullaev A.B. [Status of impurity atoms with deep levels in semiconductors in a strong compensation]. *Molodoy uchenyy*, 2011, vol. 1, no. 12, pp. 48-50. (Rus)
12. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W., Zanarini M., Siffert P. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, vol. 77, no 20, pp. 3212-3214. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1324980>

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A^3B^5 . — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано фізичні основи створення напівпровідникових тензорезистивних датчиків механічних величин. Наведено характеристики тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A^3B^5 та результати досліджень впливу електронного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів кремнію. Розглянуто технологічні основи виготовлення датчиків механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію для різних температурних діапазонів, а також їх конструктивні особливості. Описано датчики тиску різного призначення та їхні характеристики, а також датчики зусилля і прискорення. Розглянуто можливості створення багатофункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників і студентів, які навчаються за напрямом “Мікро- та наноелектроніка”, а також широкого загалу спеціалістів у галузі сенсорної електроніки та мікроелектроніки.

