

К. ф.-м. н. А. И. КОНДРИК¹, д. ф.-м. н. Г. П. КОВТУН^{1,2}

Украина, ¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины,

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ДЕТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА CdTe:Cl, ОБЛУЧЕННОГО НЕЙТРОНАМИ

Методом компьютерного моделирования исследовано влияние радиационных дефектов, образованных после облучения нейтронами низкой и высокой энергии, на изменение удельного сопротивления, электронной подвижности, времени жизни неравновесных носителей заряда и эффективности сбора зарядов детекторов ионизирующих излучений на основе CdTe:Cl. Установлены механизмы влияния глубоких радиационных дефектов на удельное сопротивление и деградацию детекторных свойств облученного теллурида кадмия, легированного хлором.

Ключевые слова: CdTe:Cl, детекторы, моделирование, облучение нейтронами, дефекты, глубокие уровни, сбор зарядов.

Теллурид кадмия и тройные соединения на его основе считаются одними из лучших полупроводниковых материалов, используемых для регистрации рентгеновского и гамма-излучения [1, 2]. Эти соединения применяются и в некоторых других областях, особенно широко — в неразрушающем анализе, ядерной медицине [3, 4], атомной энергетике и ядерной дозиметрии, а также рассматриваются как перспективные материалы для солнечной энергетике.

Среди основных требований, предъявляемых к материалу полупроводникового детектора ионизирующих излучений, можно выделить необходимость наличия большого значения произведения электронной подвижности μ_n на время жизни неравновесных электронов τ_n , высокого удельного сопротивления ρ и низкой концентрации i -х ловушек неравновесных носителей заряда N_i , что имеет первостепенное значение для достижения высокой эффективности сбора зарядов η . Таким требованиям удовлетворяют CdTe:Cl и CdZnTe.

В процессе эксплуатации в различных условиях эти детекторные материалы могут подвергаться воздействию агрессивной радиационной среды. Ее влияние изучалось в ряде работ на примерах облучения протонами [5, 6], нейтронами [7—10], электронами [11], гамма- [12—14] и рентгеновскими квантами [15, 16], которое приводит к искажениям в спектрах детекторов, изменениям электрофизических свойств, а большие дозы облучений — к полной деградации детекторных свойств. В [5, 10] с помощью нестационарной спектроскопии фотоиндуцированного тока (PICTS) установлено, что при всех типах облучения возникают уровни i -х дефектов, близких по энергии E_i , но имеющих разные концентрации N_i . Заметное влияние на свойства детекторов оказывает облучение нейтронами вследствие их высокой проникающей способности. С увеличением флюенса нейтронов

увеличивается удельное сопротивление [8, 10], а при достижении определенной дозы нейтронного облучения происходит полная деградация эффективности сбора зарядов детекторов на основе CdTe:Cl [9, 10]. Кроме того, в детекторе на основе теллурида кадмия n -типа проводимости может резко уменьшиться электронная подвижность и время жизни неравновесных электронов [8, 17]. Конкретные причины этих явлений остаются до конца непонятыми, поскольку теллурид кадмия детекторного качества обладает высоким удельным сопротивлением (10^9 — 10^{10} Ом·см), что сильно затрудняет экспериментальное исследование его «микроскопических» свойств. Иными словами, с помощью экспериментальных методик очень сложно соотнести «макроскопические» характеристики детекторных материалов с «микроскопическими» эффектами, вызываемыми падающим нейтронным потоком, то есть параметрами дефектных состояний, введенных в кристаллическую решетку. Моделирование же макроскопических характеристик детекторных материалов (μ_n , ρ , η) с использованием таких «микроскопических» параметров, как положение уровней энергии примесей и дефектов в запрещенной зоне E_i , их сечение захвата носителей заряда σ_i и концентрация N_i , позволяет путем сопоставления вычисленных значений с экспериментально измеряемыми «макроразмерными» понятиями механизмы изменения электрофизических и детекторных свойств исследуемых полупроводниковых материалов под влиянием агрессивной радиационной среды.

Целью настоящей работы было исследование механизмов влияния радиационных дефектов, возникающих под влиянием нейтронного облучения, на изменение электрофизических свойств CdTe:Cl и величину эффективности сбора зарядов детекторов излучений на основе этого материала.

Теоретическая модель и состав образцов

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с использованием в качестве исходных параметров значений N_i, E_i, σ_i , опубликованных в научно-технической литературе.

Для моделирования динамики изменения свойств CdTe:Cl были использованы физическая и математическая модели, подробно описанные и апробированные на достоверность в [18].

Для определения уровня Ферми F и концентрации свободных носителей заряда в приближении параболических зон была применена многоуровневая модель компенсации для произвольного количества примесей и дефектов с построением и численным решением соответствующего уравнения электронейтральности. Электронную подвижность рассчитывали с учетом механизмов рассеяния на ионизированных и нейтральных центрах, акустических фонах, пьезоэлектрических фонах, оптических фонах, а также на неоднородностях легирования. Подвижность дырок полагалась неизменной и равной $70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Удельное сопротивление рассчитывалось как величина, обратная удельной проводимости, состоящей из электронной и дырочной составляющих. Время жизни неравновесных носителей заряда рассчитывалось согласно модели рекомбинации Шокли — Рида — Холла, а эффективность сбора зарядов детектора определяли по уравнению Хехта [1, с. 489]. Межэлектродное расстояние плоского детектора принималось равным 5 мм, а напряженность электрического поля 1000 В/см .

В таблице представлен типичный исходный состав CdTe:Cl, описанный, например, в [10, 15, 19—21]. Конкретные значения содержания примесей и дефектов и обозначения их уровней энергии взяты из [10]. Методика PICTS, использованная в данной работе для определения состава образца, позволяет точно измерить только энергию дефектов, но не их концентрацию. По этой причине значения N_i , представленные в таблице, были выбраны такими, чтобы они соответствовали величинам, указанным в [19], и обеспечивали необходимые для материала детекторного качества дырочную проводимость и высокое удельное сопротивление — $2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, измеренное в [10]. Следует отметить, что поскольку в [10] все рассуждения, результаты и выводы носят качественный характер, полученные в настоящей работе модельные зависимости и результаты моделирования также могут быть только качественными.

В таблице приведены значения сечения захвата уровней σ_i , порядок величин которых определен в [22], где одновременно учитывался вклад всех уровней в токи затухания, эмитируемые в соответствующие зоны. Указано также зарядовое состояние дефектов: плюс — для доноров, энергия которых отсчитывается от дна зоны проводимости E_C ; минус — для акцепторов с уровнями, отсчитываемыми от потолка

Исходный состав CdTe:Cl, обладающего удельным сопротивлением $2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [10, 19]

Дефект	Параметр		
	$E_i, \text{ эВ}$	$\sigma_i, \text{ см}^2$	$N_i, \text{ см}^{-3}$
AX^-	0,11	10^{-19}	$2 \cdot 10^{15}$
$A0^-$	0,12	10^{-19}	$5 \cdot 10^{15}$
A^-	0,14	10^{-19}	$5 \cdot 10^{15}$
$A1^-$	0,16	$2 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^{14}$
X^-	0,29	10^{-18}	$5 \cdot 10^{14}$
DX^{2-}	0,41	10^{-17}	$5 \cdot 10^{15}$
Z^+	0,47	10^{-16}	$1 \cdot 10^{15}$
Y^-	0,67	10^{-18}	$3 \cdot 10^{15}$
W^-	0,70	10^{-18}	$3 \cdot 10^{15}$
H^-	0,77	10^{-18}	$5 \cdot 10^{15}$
HI^+	0,82	10^{-18}	$7 \cdot 10^{15}$
I^+	1,0	10^{-16}	$1 \cdot 10^{16}$

валентной зоны E_V . Поведение представленных дефектов в процессе нейтронного облучения обсуждается в [10], однако там не рассматривается их физическая природа, хотя в настоящее время уже известно, что мелкие акцепторы $AX, A0, A, A1$ — это комплексы вакансий кадмия с различными фоновыми примесями и хлором. Принадлежность некоторых глубоких уровней к разным дефектам будет обсуждаться ниже.

Кроме приведенных в таблице дефектов, в материале присутствует также примесь хлора, которая вводится в матрицу как примесь замещения на месте теллура Cl_{Te} и выступает в роли донора, предназначенного для компенсации мелких акцепторов ($AX, A0, A, A1, X$) и достижения высокоомного состояния CdTe:Cl, необходимого для детекторов. Энергия активации Cl_{Te} относительно края зоны проводимости E_C составляет $0,014 \text{ эВ}$ при низкой, около 10 К , температуре. При комнатной температуре — рабочей температуре детектора — уровень энергии Cl_{Te} переходит в зону проводимости. С повышением температуры от 10 до 300 К величина запрещенной зоны CdTe уменьшается примерно на $0,1 \text{ эВ}$.

Результаты и их обсуждение

В [10] исследуемый материал CdTe:Cl облучали потоками низкоэнергетических нейтронов ($\approx 10 \text{ эВ}$) с флюенсами от 10^{10} до 10^{14} см^{-2} и высокоэнергетических нейтронов ($\approx 500 \text{ кэВ}$) с флюенсами J от 10^{11} до 10^{13} см^{-2} с шагом величины потока один порядок. Радиационные донорные дефекты Z в теллуриде кадмия возникают уже на первой стадии облучения и да-

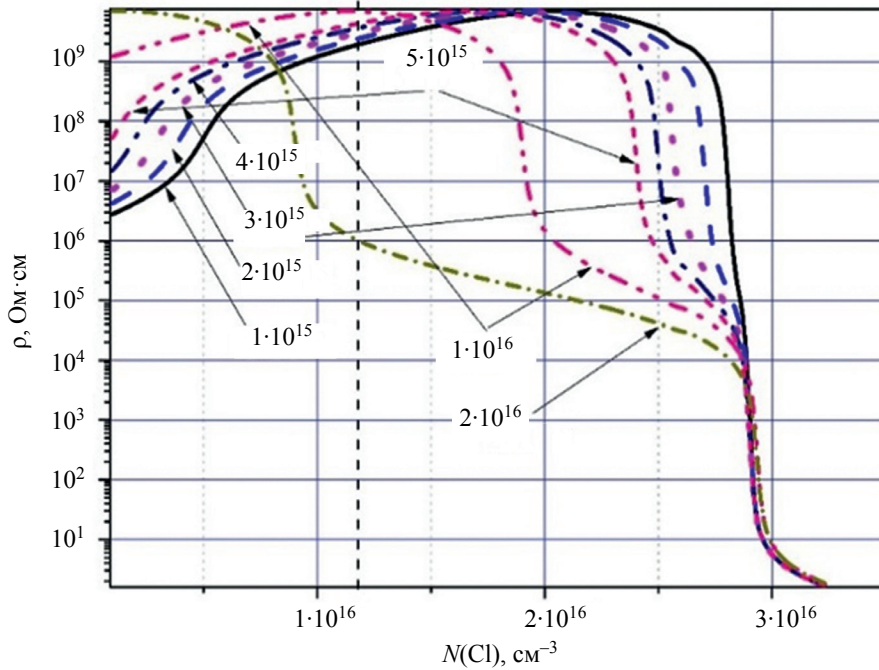


Рис. 1. Зависимости удельного сопротивления CdTe:Cl от концентрации легирующего хлора, полученные при комнатной температуре для различных значений концентрации радиационных донорных дефектов Z (в см^{-3}) (вертикальная пунктирная линия соответствует исследуемому образцу)

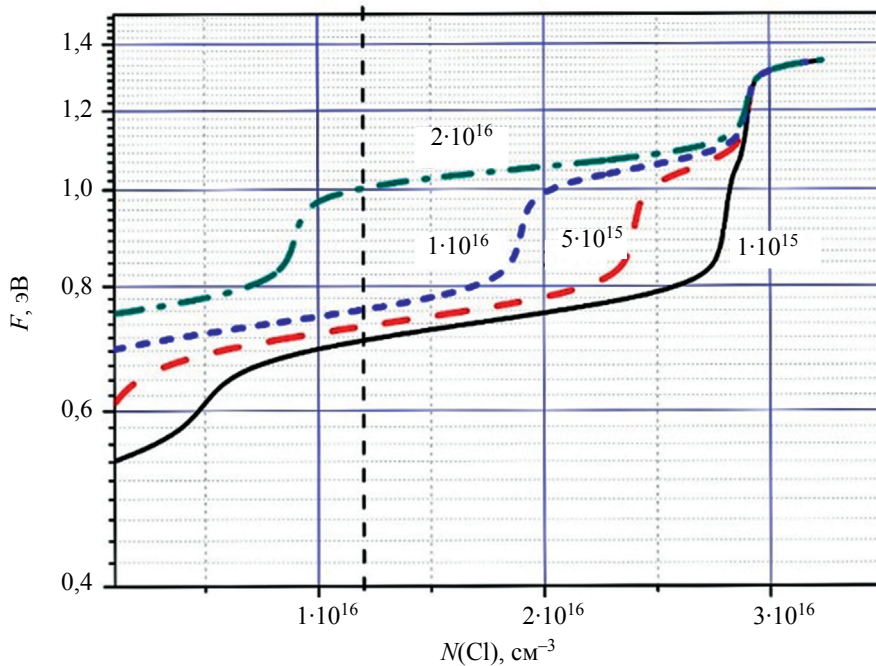


Рис. 2. Зависимости уровня Ферми, отсчитываемого от потолка валентной зоны E_V , от содержания хлора для различных значений концентрации радиационных донорных дефектов Z (в см^{-3}) (вертикальная пунктирная линия соответствует исследуемому образцу)

более присутствуют на всех стадиях, причем в момент полной деградации регистрирующихся свойств детектора амплитуда импульса от этих дефектов в спектре максимальна. При этом удельное сопротивление возрастает на 50% после низкоэнергетического облучения и примерно на порядок после облучения высоко-

энергетическими нейтронами 10^{13} см^{-2} , а удельное сопротивление возрастало скачкообразно примерно до $1,5 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при комнатной температуре. Однако моделирование показало, что максимально возможное удельное сопротивление исследуемого CdTe:Cl при комнатной температуре не может превышать $6,9 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, когда уровень Ферми

энергетическими нейтронами. В связи с этим представляло интерес смоделировать динамику изменения удельного сопротивления при увеличении концентрации радиационных донорных дефектов, которые вызывают резкое уменьшение эффективности сбора зарядов и полную деградацию детекторных свойств.

На рис. 1 показан результат моделирования зависимости удельного сопротивления ρ для CdTe:Cl от концентрации легирующей примеси хлора при разном содержании дефектов Z — от $1 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Вычисления показали, что $\rho = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при концентрациях $N(Z) = 0$ и $N(Z) = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, как и было измерено экспериментально для необлученного материала в [10], и это состояние принято в качестве исходного.

Для исследуемого образца путем сравнения приращения $\Delta\rho$, измеренного после каждой стадии облучения [10, рис. 3], можно поставить в приблизительное соответствие определенную концентрацию дефектов Z , полученную из модельных результатов, часть из которых приведена на рис. 1.

После облучения низкоэнергетическими нейтронами флюенсом $J = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ $\Delta\rho = 30\%$, что соответствует $N(Z) \approx 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; при $J = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $\Delta\rho = 40\%$ и $N(Z) \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При этом в эксперименте наблюдалась частичная деградация эффективности сбора зарядов.

В случае облучения высокоэнергетическими нейтронами полная деградация эффективности сбора зарядов наблюдалась после облучения флюенсом

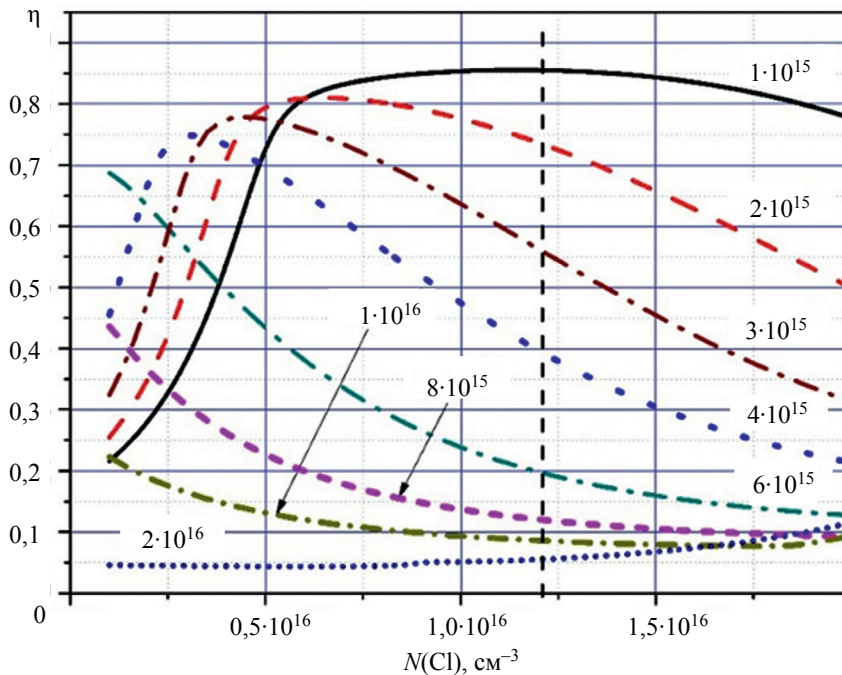


Рис. 3. Зависимости эффективности сбора зарядов детектора на основе CdTe:Cl от содержания легирующего хлора для различных значений концентрации радиационных донорных дефектов Z (в см^{-3})

(вертикальная пунктирная линия соответствует исследуемому образцу)

находится примерно в середине запрещенной зоны, а концентрация радиационных дефектов достигает примерно $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2). При дальнейшем увеличении $N(Z)$ уровень Ферми смещается ближе к зоне проводимости, в окрестность уровня Z , удельное сопротивление уменьшается и при $N(Z) \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ составляет $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (см. рис. 1), а проводимость становится электронной.

Таким образом, наблюдаемый в эксперименте [10] резкий скачок ρ после облучения CdTe:Cl высокоэнергетическими нейтронами флюенсом 10^{13} см^{-2} можно объяснить не влиянием радиационных глубоких уровней на уровень Ферми, а перестройкой кристаллической структуры теллурида кадмия с изменением постоянной решетки и увеличением ширины запрещенной зоны, сопровождающемся резким изменением параметров проводимости.

Моделирование показало также, что при увеличении содержания радиационных донорных дефектов заметно падает эффективность сбора зарядов η , т. е. происходит полная деградация регистрирующих свойств детектора, что демонстрируется кривыми с $N(Z) = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N(Z) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на рис. 3 и качественно подтверждается результатами эксперимента, описанного в [10]. Концентрации $N(Z) = (1-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на рис. 3 приблизительно соответствуют значению $N(Z)$, полученному после облучения высокоэнергетическими нейтронами флюенсом 10^{13} см^{-2} , а $N(Z) = (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — низкоэнергетическими нейтронами флюенсами от 10^{11} до 10^{12} см^{-2} . Из рис. 3 также можно увидеть, что в случае $N(Z) = (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ происходит частичная по-

теря регистрирующих свойств детектора на основе CdTe:Cl, что качественно соответствует результатам эксперимента [10].

Таким образом, качественное соответствие результатов моделирования с экспериментом позволяет объяснить причины изменения удельного сопротивления и полной деградации эффективности сбора зарядов детектора на основе CdTe:Cl после нейтронного облучения. Повышение удельного сопротивления ρ в процессе облучения низкоэнергетическими нейтронами ($\approx 10 \text{ эВ}$) вызвано заметным увеличением концентрации глубоких доноров Z с уровнем энергии примерно 1 эВ относительно края E_V валентной зоны, который увлекает уровень Ферми в середину запрещенной зоны, где он закрепляется в окрестности уровней H , $H1$. Эти уровни оказывают стабилизирующее влия-

ние на величину ρ на начальных стадиях облучения. Наблюдаемый резкий скачок ρ после облучения высокоэнергетическими нейтронами ($\approx 500 \text{ кэВ}$) флюенсом 10^{13} см^{-2} можно объяснить перестройкой кристаллической структуры теллурида кадмия.

Деградация регистрирующих свойств детектора в процессе облучения низкоэнергетическими нейтронами, а также на начальных стадиях облучения высокоэнергетическими нейтронами происходит в основном из-за захвата неравновесных носителей заряда глубокими донорными дефектами Z , $H1$, I и глубоким акцептором H (см. таблицу), а также по причине рекомбинации носителей заряда на них. Моделирование показало, что такая деградация происходит главным образом благодаря заметному (в несколько десятков раз) уменьшению времени жизни неравновесных электронов. Точно указать причину полной деградации эффективности сбора зарядов детектора после облучения высокоэнергетическими нейтронами ($E \approx 500 \text{ кэВ}$, $J = 10^{13} \text{ см}^{-2}$) пока что не представляется возможным, поскольку остаются неизвестными микроскопические параметры CdTe:Cl после такой нейтронной обработки.

В настоящее время нет однозначной интерпретации физической природы вышеуказанных глубоких уровней, однако проведенный анализ научно-технических публикаций показал, что дефект Z^- можно связать с межузельным теллуром, $H1^+$ — с теллуром на месте кадмия, I^+ — с вакансией теллура. Природа глубокого акцептора H^- пока что не выяснена, возможно, тут есть связь с вакансией кадмия, хотя по мнению большинства исследователей энергия активации вакансии

кадмия должна быть ниже уровня H^- относительно потолка валентной зоны E_V .

Электронная подвижность μ_n играет важную роль в сборе зарядов детектора, и существенное снижение μ_n может серьезно ухудшить его регистрирующую способность. Представляло интерес исследовать характер изменения μ_n в зависимости от содержания глубоких дефектов, оказывающих заметное влияние на детекторные свойства, и особенно от концентрации дефекта Z , вызывающего полную деградацию детектора.

На рис. 4 представлена трехмерная зависимость изменения подвижности электронов μ_n от содержания глубокого донора Z и глубокого акцептора H . При моделировании предполагалось, что дефекты Z и H распределены равномерно по объему кристалла.

Анализируя рис. 4, можно отметить два основных момента. Во-первых, вычисленная подвижность электронов μ_n близка к величине 1100 — 1200 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, хорошо известной из многих экспериментов. Во-вторых, изменение на порядок концентрации равномерно распределенных по кристаллу дефектов, сильно влияющих на детекторные свойства, не оказывает заметного влияния на μ_n , которая изменяется незначительно — в пределах 1% по абсолютной величине.

Наблюдающееся в некоторых экспериментах резкое уменьшение электронной подвижности в CdTe:Cl может быть вызвано влиянием скопления дефектов, образованных под воздействием нейтронной бомбардировки, на рассеяние электронов проводимости. Для проверки этого предположения было проведено моделирование в соответствии с [18, с. 45], которое позволило оценить влияние областей скопления дефектов на μ_n в теллуриде кадмия.

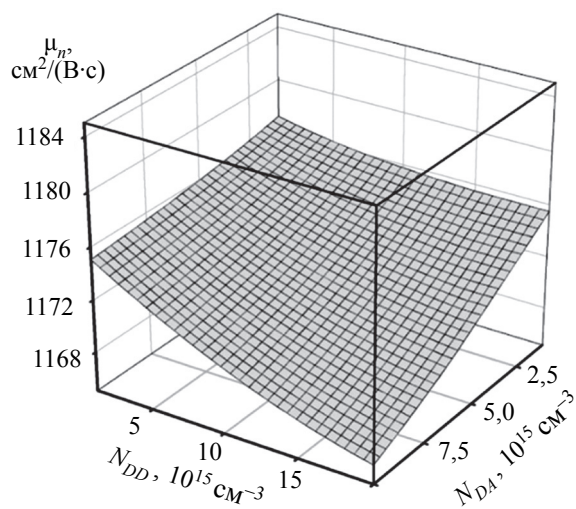


Рис. 4. Изменение электронной подвижности в зависимости от концентрации глубокого донора (N_{DD}) и глубокого акцептора (N_{DA})

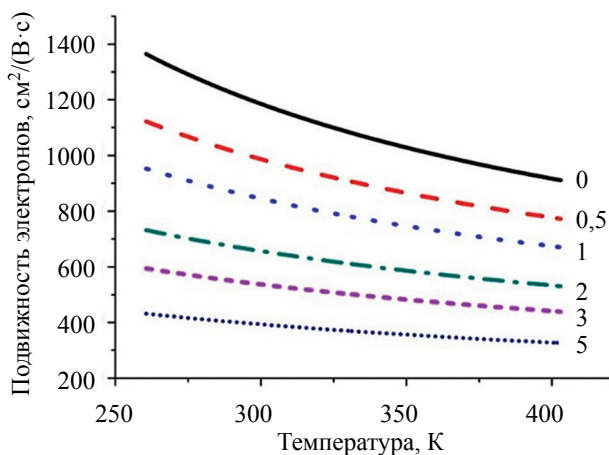


Рис. 5. Температурные зависимости подвижности электронов в CdTe:Cl для разных значений концентрации кластеров (ед. изм. 10^{11} см^{-3}) дефектов с поперечным сечением $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$

На рис. 5 показаны результаты расчета, которые проводились в предположении рассеяния электронов проводимости на микроскопических скоплениях дефектов, обладающих определенным сечением, без учета искажений и поляризации решетки. Здесь видно, что концентрация кластеров дефектов существенно влияет на подвижность электронов: чем она больше, тем подвижность меньше. Уменьшение μ_n , а также резкое снижение времени жизни неравновесных электронов τ_n (из-за захвата и рекомбинации на радиационных уровнях) может привести к сильному снижению произведения $\mu_n \tau_n$ и полной деградации детекторных свойств. Ранее, в [18], было установлено, что аналогичное влияние на электронную подвижность оказывают примесные кластеры в $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$.

Выводы

Повышение удельного сопротивления CdTe:Cl при его бомбардировке низкоэнергетическими нейтронами и на начальных стадиях бомбардировки высокоэнергетическими нейтронами вызвано увеличением концентрации радиационных донорных дефектов Z (уровень энергии $E_C - 0,47 \text{ эВ}$), предположительно межузельного теллура, который смещает уровень Ферми в середину запрещенной зоны. Резкий скачок ρ , который наблюдается при бомбардировке высокоэнергетическими нейтронами флюенсом 10^{13} см^{-2} , вызван перестройкой кристаллической структуры детекторного материала с изменением постоянной решетки и, возможно, увеличением ширины запрещенной зоны, сопровождающимся резким изменением свойств проводимости.

Деградация детекторных свойств CdTe:Cl при облучении нейтронами происходит вследствие захвата и рекомбинации неравновесных электронов на радиационных глубоких донорных дефектах — межузельном Te, на теллуре на месте кадмия, на вакан-

сиях теллура, а также на глубоких акцепторах — вакансиях кадмия.

Если при нейтронном облучении CdTe:Cl происходит деградация электронной подвижности, то это может быть вызвано рассеянием электронов на областях скопления радиационных структурных дефектов. При равномерном распределении дефектов по объему кристалла увеличение их концентрации вплоть до 10^{16} см^{-3} не влияет существенно образом на электронную подвижность при комнатной температуре.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Knoll G. F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
- Csaba Szeles. CdZnTe and CdTe materials for X-ray and gamma ray radiation detector applications. *Physica Status Solidi (b)*, 2004, vol. 241, iss. 3, pp. 783–790. <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.200304296>
- Jambi L.K., Lees J.E., Bugby S. et al. Evaluation of XRI-UNO CdTe detector for nuclear medical imaging. *Journal of Instrumentation*, 2015, no. 10, P06012. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/06/P06012>
- Samira Abbaspour, Babak Mahmoudian, Jalil Pirayesh Islamian. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Medicine*, 2017, no. 16 (2), pp. 101–107. <http://dx.doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
- Fraboni B., Cavallini A., Auricchio N., Bianconi M. Deep traps induced by 700 keV protons in CdTe and CdZnTe detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, iss. 4, pp. 828–833. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2007.902364>
- Lamb D. A., Underwood C. I., Barriozet V. al. Proton irradiation of CdTe thin film photovoltaics deposited on cerium-doped space glass. *Progress in Photovoltaics*, 2017, vol. 25, iss. 12, pp. 10059–1067. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2923>
- Xianf Chen, He-tong Han, Gang Li, Yi Lu. Accumulative dose response of CdZnTe detectors to 14.1 MeV neutrons. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Sec. B*, 2017, vol. 394, pp. 97–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.01.001>
- Пляцко С. В., Рашковецкий Л. В. Глубокие центры радиационных дефектов в монокристаллах CdZnTe, созданные потоком быстрых нейтронов. *Физика и техника полупроводников*, 2018, т. 52, вып. 3, с. 322–326. <http://dx.doi.org/10.21883/FTP.2018.03.45615.8373>
- Miyamaru H., Fujii K., Iida T., Takahashi A. Effect of fast neutron irradiation on CdTe radiation detectors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1997, vol. 34, no. 8, pp. 755–759. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1997.9733739>
- Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 5, pp. 3135–3142. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>
- Loginov Yu. Yu., Mozzherin A. V., Paklin N. N. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation. *21st Int. Scientific Conference Reshetnev Readings-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 467, pp. 012007. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/467/1/012007>
- Кондрик А. И. Детекторные свойства $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{Al}$ под влиянием γ -облучения малой дозы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, № 1, с. 12–19. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.1.12>
- Karunathan R., Mohanraj K., Chandrasekaran J., Babu B. Effect of gamma irradiation on structural properties of CdTe thin films. *Chemical Letters*, 2018, vol. 1, iss. 1, pp. 19–22. <http://dx.doi.org/10.26524/cl1814>
- Kumar S., Kumar M. V., Pattabi M. et al. Effect of gamma irradiation on electrical properties of CdTe/CdS solar cells. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 10, part 3, pp. 22570–22575. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.630>
- 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, pp. 093713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
- Dreier Erik Schou, Kehres Jan, Khalil Mohamad et al. Spectral correction algorithm for multispectral CdTe X-ray detectors. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 054117-1–054117-13. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.57.5.054117>
- Miyamaru H., Iida T., Takahashi A. Improvement of radiation response characteristic on CdTe detectors using fast neutron irradiation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1999, vol. 36, iss. 1, pp. 54–60. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1999.9726181>
- Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe и CdZnTe. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5–6, с. 43–50. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.43>
- Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
- Fraboni B., Cavallini A., Dusi W. Damage induced by ionizing radiation on CdZnTe and CdTe detectors. *Nuclear Science, IEEE Transactions*, 2004, vol. 51, iss. 3, pp. 1209–1215. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2004.829445>
- Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu et al. Compensation processes in high-resistivity $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals doped with In/Al. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/30/8/082002>
- Nan Rui-hua1, Jie Wan-qil, Zha Gang-qiang et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, pp. s148–s152. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.02.2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.22
УДК 621.315.592.3О. І. КОНДРИК¹, Г. П. КОВТУН^{1,2}Україна, м. Харків, ¹ННЦ «ХФТІ» НАН України,
²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
E-mail: kondrik@kipt.kharkov.uaВПЛИВ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ
ТА ДЕТЕКТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ CdTe:Cl,
ОПРОМІНЕНОГО НЕЙТРОНАМИ

Перспективним матеріалом для напівпровідникових детекторів іонізуючих випромінювань є CdTe:Cl, який дозволяє одержувати детектори з великими питомим опором ρ та електронною рухливістю μ_n . В процесі експлуатації детекторні матеріали можуть піддаватися впливу нейтронного опромінення, в результаті чого в кристалічній решітці виникають радіаційні дефекти, а в забороненій зоні з'являються глибокі рівні, які діють як центри захоплення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду, знижуючи респонсивність детектора.

Метою даної роботи було дослідження методом комп'ютерного моделювання механізмів впливу радіаційних дефектів, що виникають під дією нейтронного опромінення, на електрофізичні властивості (ρ , μ_n) CdTe:Cl та ефективність збору зарядів η детекторів випромінювань на основі цього матеріалу.

Моделювання проводилось на основі апробованих на достовірність моделей. Було встановлено, що підвищення питомого опору ρ CdTe:Cl при його бомбардуванні низькоенергетичними нейтронами і на початкових стадіях бомбардування високоенергетичними нейтронами викликано збільшенням концентрації радіаційних донорних дефектів Z (з рівнем енергії $E_C - 0.47$ eV), ймовірно міжвузельного телуру, який зміщує рівень Фермі в середину забороненої зони. Різкий стрибок ρ , який спостерігається при бомбардуванні високоенергетичними нейтронами, ймовірно викликаний перебудовою кристалічної структури детекторного матеріалу зі зміною постійної решітки та збільшенням ширини забороненої зони, що супроводжується зміною властивостей провідності. Деградація детекторних властивостей CdTe:Cl при опроміненні нейтронами відбувається внаслідок захоплення і рекомбінації нерівноважних електронів на радіаційних дефектах: на міжвузельному Te, на телурі на місці кадмію, на вакансіях телуру та вакансіях кадмію. Деградація електронної рухливості може бути викликана розсіюванням електронів на мікроскопічних областях скупчень радіаційних дефектів. При рівномірному розподілі дефектів по об'єму кристала підвищення їхньої концентрації аж до 10^{16} см⁻³ істотно не впливає на електронну рухливість за кімнатної температури.

Ключові слова: CdTe:Cl, детектори, моделювання, опромінення нейтронами, дефекти, глибокі рівні, збір зарядів.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.22
UDC 621.315.592.3A. I. KONDRUK¹, G. P. KOVTUN^{1,2}Ukraine, Kharkiv, ¹NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,
²V. N. Karazin Kharkiv National University
E-mail: kondrik@kipt.kharkov.uaINFLUENCE OF RADIATION DEFECTS ON THE ELECTROPHYSICAL
AND DETECTOR PROPERTIES OF CdTe:Cl IRRADIATED BY NEUTRONS

A promising material for semiconductor detectors of ionizing radiation is CdTe:Cl which allows obtaining detectors with high resistivity ρ and electron mobility μ_n . During operation, the detector materials may be exposed to neutron irradiation, which causes radiation defects to form in crystal lattice and deep levels to appear in the band gap, acting as centers of capture and recombination of nonequilibrium charge carriers, thus reducing the detection capability. The aim of this study was to use computer simulation to investigate the mechanisms of the influence of such radiation defects on the electrophysical properties (ρ , μ_n) of CdTe:Cl and the charge collection efficiency η of radiation detectors based on this material.

The simulations were based on the models tested for reliability. It was found that the increase of the CdTe:Cl resistivity ρ during low-energy neutrons bombardment and at the initial stages of high-energy neutrons bombardment is caused by an increase in the concentration of radiation donor defect Z (with an energy level $E_C - 0.47$ eV), presumably interstitial tellurium, which shifts the Fermi level into the middle of the band gap. The sharp rise of ρ observed at high-energy neutron bombardment is probably caused by the restructuring of the crystalline structure of the detector material with a change in the lattice constant and with an increase of the band gap, accompanied by a change in the conductivity properties. The degradation of the detector properties of CdTe:Cl during neutron irradiation is due to the capture and recombination of nonequilibrium electrons at

radiation defects: Te interstitial, Te substitutional at the cadmium site, on tellurium vacancies and cadmium vacancies. The degradation of electron mobility μ_n can be caused by the scattering of electrons at microscopic areas of radiation defect clusters. The increase in concentration of the defects over the volume of the crystal at their uniform distribution of up to 10^{16} cm^{-3} does not significantly affect the electron mobility at room temperature.

Keywords: CdTe:Cl, detectors, modeling, neutron irradiation, defects, deep levels, charge collection.

REFERENCES

- Knoll G. F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
- Csaba Szeles. CdZnTe and CdTe materials for X-ray and gamma ray radiation detector applications. *Physica Status Solidi (b)*, 2004, vol. 241, iss. 3, pp. 783–790. <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.200304296>
- Jambi L.K., Lees J.E., Bugby S. et al. Evaluation of XRI-UNO CdTe detector for nuclear medical imaging. *Journal of Instrumentation*, 2015, no. 10, P06012. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/06/P06012>
- Samira Abbaspour, Babak Mahmoudian, Jalil Pirayesh Islamian. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Medicine*, 2017, no. 16 (2), pp. 101–107. <http://dx.doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
- Fraboni B., Cavallini A., Auricchio N., Bianconi M. Deep traps induced by 700 keV protons in CdTe and CdZnTe detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, iss. 4, pp. 828–833. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2007.902364>
- Lamb D. A., Underwood C. I., Barriozet V. al. Proton irradiation of CdTe thin film photovoltaics deposited on cerium-doped space glass. *Progress in Photovoltaics*, 2017, vol. 25, iss. 12, pp. 10059–1067. <http://dx.doi.org/10.1002/pp.2923>
- Xianf Chen, He-tong Han, Gang Li, Yi Lu. Accumulative dose response of CdZnTe detectors to 14.1 MeV neutrons. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Sec. B*, 2017, vol. 394, pp. 97–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.01.001>
- Plyatsko S. V., Rashkovetskiy L. V. [Deep centers of radiation defects in CdZnTe single crystals created by a fast neutron flux]. *Semiconductors/Physics of the Solid State*, 2018, vol. 52, iss. 3, pp. 322–326. <http://dx.doi.org/10.21883/FTP.2018.03.45615.8373> (Rus)
- Miyamaru H., Fujii K., Iida T., Takahashi A. Effect of fast neutron irradiation on CdTe radiation detectors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1997, vol. 34, no. 8, pp. 755–759. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1997.9733739>
- Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 5, pp. 3135–3142. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>
- Loginov Yu. Yu., Mozherin A. V., Paklin N. N. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation. *21st Int. Scientific Conference Reshetnev Readings-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 467, pp. 012007. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/467/1/012007>
- Kondrik A. I. Detector properties of Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:Al under the influence of low dose gamma irradiation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 1, pp. 12–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.12> (Rus)
- Karunathan R., Mohanraj K., Chandrasekaran J., Babu B. Effect of gamma irradiation on structural properties of CdTe thin films. *Chemical Letters*, 2018, vol. 1, iss. 1, pp. 19–22. <http://dx.doi.org/10.26524/cl1814>
- Kumar S., Kumar M. V., Pattabi M. et al. Effect of gamma irradiation on electrical properties of CdTe/CdS solar cells. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 10, part 3, pp. 22570–22575. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.630>
- Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of Cd_{1-x}Zn_xTe detectors. *J. Appl. Phys.* 2009, vol. 106, pp. 093713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
- Dreier Erik Schou, Kehres Jan, Khalil Mohamad et al. Spectral correction algorithm for multispectral CdTe X-ray detectors. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 054117-1–054117-13. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.57.5.054117>
- Miyamaru H., Iida T., Takahashi A. Improvement of radiation response characteristic on CdTe detectors using fast neutron irradiation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1999, vol. 36, iss. 1, pp. 54–60. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1999.9726181>
- Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5–6, pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43> (Rus)
- Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and Cd_{1-x}Zn_xTe. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
- Fraboni B., Cavallini A., Dusi W. Damage induced by ionizing radiation on CdZnTe and CdTe detectors. *Nuclear Science, IEEE Transactions*, 2004, vol. 51, iss. 3, pp. 1209–1215. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2004.829445>
- Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu et al. Compensation processes in high-resistivity Cd_{1-x}Zn_xTe crystals doped with In/Al. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/30/8/082002>
- Nan Rui-hua1, Jie Wan-qi1, Zha Gang-qiang et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, pp. s148–s152. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)

Описание статьи для цитирования:

Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние радиационных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe:Cl, облученного нейтронами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 22–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of radiation defects on the electrophysical and detector properties of CdTe:Cl irradiated by neutrons. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 22–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22>