

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ДЕТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ

К. ф.-м. н. А. И. Кондрик

ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Украина, г. Харьков

kondrik@kipt.kharkov.ua

Установлены механизмы влияния радиационно-стимулированных уровней дефектов, возникающих в процессе облучения нейтронами на увеличение удельного сопротивления ρ , изменение электронной подвижности μ_n , уменьшения времени жизни неравновесных электронов и деградацию эффективности сбора зарядов детекторов ионизирующих излучений на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$. Полученные результаты будут способствовать поиску оптимальных путей повышения радиационной стойкости и детекторного качества материалов $CdZnTe$.

Ключевые слова: $CdZnTe$, радиационные дефекты, детекторные свойства, моделирование.

Одним из перспективных материалов для неохлаждаемых детекторов гамма- и рентгеновского излучения является полупроводниковое соединение $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$, обладающее повышенной шириной запрещенной зоны и позволяющее получать датчики с большим объемом активной области, высоким удельным сопротивлением ρ , высокой электронной подвижностью μ_n и большим значением произведения μ_n на время жизни неравновесных электронов τ_n , дырочной подвижности μ_p на время жизни неравновесных дырок τ_p . В процессе эксплуатации детекторы на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ могут подвергаться воздействию радиационной среды в виде облучения нейтронами, в результате чего в кристаллической решетке возникают радиационные дефекты, которым в запрещенной зоне соответствуют глубокие уровни, действующие как центры захвата неравновесных носителей заряда. Эти радиационные дефекты заметно влияют на степень компенсации, изменяя ρ детекторного материала, на процессы рекомбинации, снижая τ_n и τ_p , а также на рассеяние электронов, уменьшая μ_n , что в конечном счете способно вызвать деградацию эффективности сбора зарядов η . Для выработки мер по улучшению характеристик $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ необходимо сначала выяснить конкретные причины воздействия нейтронного облучения на его электрофизические и детекторные свойства. Из-за высокого удельного сопротивления $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ ($\rho \approx 10^{10} - 10^{11}$ Ом·см) и разной степени компенсации при различных температурах в настоящее время только экспериментальными методами, с помощью которых измерения, как правило, проводятся в широком температурном интервале, нельзя установить однозначное соответствие между характеристиками уровней дефектов и электрофизическими (ρ , μ_n , τ_n , τ_p) и детекторными (η) свойствами этого материала [1—3]. Необходимо дополнительно к экспериментальным результатам применять методы компьютерного моделирования.

Целью работы было выяснение методом моделирования механизмов влияния радиационных дефектов на электрофизические свойства $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ и деградацию эффективности сбора зарядов в детекторах на основе этого материала с использованием экспериментально измеренных параметров.

Использованные в исследованиях модели и их соответствие эксперименту описаны в [4]. В качестве исходных данных для расчетов были использованы экспериментально измеренные и опубликованные в технической литературе следующие характеристики дефектов: концентрация, положение в запрещенной зоне, сечение захвата уровнями неравновесных носителей заряда. Определен состав фоновых примесей и дефектов в $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$, который обеспечил совпадение вычисленного удельного сопротивления $\rho = 1 \cdot 10^{11}$ Ом·см с величиной, экспериментально измеренной в [3] для исходного материала до нейтронного облучения. Остальные рассчитанные электрофизические свойства исходного необлученного материала соответствовали хорошо известным величинам: $\mu_n = 1150$ см²/(В·с), τ_n , $\tau_p \approx 10^{-6}$ с. Было проведено моделирование изменения удельного сопротивления $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$, подвижности электронов, времени жизни неравновесных электронов и дырок, положения уровня Ферми в запрещенной зоне и эффективности сбора зарядов детектора в зависимости от содержания радиационных дефектов и легирующего мелкого донора при $T = 20^\circ\text{C}$ — рабочей температуре детекторов.

Результаты моделирования показали свое соответствие экспериментальным данным [3]. Выяснено, что в процессе бомбардировки высокоэнергетическими нейтронами происходит радиационная самокомпенсация облучаемого материала с образованием электрически активных радиационно стимулированных глубоких доноров, суммарное содержание которых выше, чем концентрация электрически активных акцепторных дефектов — вакансий кадмия и их комплексов с фоновыми примесями. Удельное сопротивление ρ материала монотонно возрастает по мере увеличения флюенса нейтронов от 10^{11} до 10^{13} см⁻² по причине увеличения содержания антиструктурного дефекта Te_{Cd} (уровень энергии 0,77 эВ относительно дна зоны проводимости E_C), который расширяет область высокоомного состояния в диапазонах изменения концентрации легирующих и радиационных дефектов, а также отодвигает уровень Ферми всередину запрещенной зоны, уменьшая тем самым концентрацию свободных носителей заряда. Радиационный дефект вакансии теллура V_{Te} , который по амплитуде пика является доминирующим в спектрах, приведенных в [3], не участвует в процессах компенсации из-за его большой энергии активации ($E_a = E_C - 1,1$ эВ) и, таким образом, не влияет на изменение удельного сопротивления. Кроме того, V_{Te} не захватывает неравновесные носители заряда и не влияет на процесс деградации детекторных свойств из-за большой разницы между энергией Ферми и энергетическим уровнем V_{Te} в высокоомном состоянии.

Анализ показал, что полная деградация эффективности сбора зарядов детектора η происходит из-за захвата и рекомбинации неравновесных электронов на уровне радиационных глубоких доноров с энергией 0,52 эВ относительно дна зоны проводимости E_C , а также на донорном уровне антиструктурного дефекта теллур на месте кадмия Te_{Cd} с энергией $E_C - 0,77$ эВ. В роли радиационного дефекта с энергией $E_C - 0,52$ эВ может выступать теллур межузельный. Время жизни неравновесных дырок исследуемого материала мало изменяется при увеличении флюенса нейтронов вплоть до 10^{13} см⁻² с энергией 500 кэВ, поэтому рекомбинация неравновесных дырок на радиационных уровнях слабо влияет на деградацию сбора зарядов в процессе облучения $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$. Установлено также, что темп межзонной рекомбинации в исследуемом материале примерно на 10 порядков ниже, чем рекомбинация через уровни дефектов.

Определено, что радиационно-стимулированные дефекты, равномерно распределенные по объему кристалла, существенно не влияют на электронную подвижность вплоть до их концентрации 10^{16} см⁻³. Это объясняется тем, что при рабочей температуре детекторов на основе $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ преимущественный вклад в рассеяние электронов дает их рассеяние на оптических фонах, частота столкновений с которыми согласно приблизительным оценкам в приближении времени релаксации составляет не менее 97% от суммарной частоты столкновений.

Полученные результаты призваны способствовать поиску оптимальных путей повышения радиационной стойкости и улучшения детекторного качества материалов CdZnTe .

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 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.
2. Xianf Chen, Hetong Han, Gang Li, Yi Lu. Accumulative dose response of CdZnTe detectors to 14.1 MeV neutrons // Nuclear Instruments and Methods. in Physics Research Sec. B.— 2017.— Vol. 394.— P. 97–102.
3. 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, №5.— P. 3135–3142.
4. 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.

A. I. Kondrik

Influence of radiation induced defects on detector properties of $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ after neutron irradiation

The author determines the mechanisms of the influence of radiation-stimulated defect levels arising during neutron irradiation on the increase of the resistivity, the change in the electron mobility, the decrease in the lifetime of nonequilibrium electrons and the degradation of the charge collection efficiency of $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ ionizing radiation detectors. The results obtained will promote to find the optimal ways to increase the radiation resistance and detector quality of CdZnTe materials.

Keywords: CdZnTe, radiation defects, detector properties, simulation.