

Влияние упругих полей ростовых дефектов на фотодиэлектрический отклик кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

© И.А. Клименко, В.К. Комарь*, В.П. Мигаль, Д.П. Наливайко*

Государственный аэрокосмический университет "ХАИ",
61070 Харьков, Украина

* НТК "Институт монокристаллов" Национальной академии наук Украины,
61001 Харьков, Украина

(Получена 13 июня 2000 г. Принята к печати 23 июня 2000 г.)

Показано, что диаграммы диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*(\lambda)$, полученные на кристаллах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, выращенных из расплава, обладают рядом особенностей, которые не наблюдались на других кристаллах $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Установлена связь этих особенностей с разнообразием ростовых дефектов и с существенным влиянием их упругих и электрических полей на фотодиэлектрические свойства.

Влияние упругих полей двумерных дефектов структуры на фотодиэлектрические свойства кристаллов ZnSe наиболее полно отражают спектральные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь, представленные в виде диаграмм $\varepsilon^*(\lambda)$ на комплексной плоскости [1]. Оказалось, что одной полосе в спектре fotocувствительности может соответствовать несколько дугообразных участков диаграммы $\varepsilon^*(\lambda)$, которые отражают вклады в фотодиэлектрический отклик отдельных групп релаксаторов с близкими временами релаксации τ [2]. Выращенные из расплава кристаллы $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ являются перспективными высокоомными полупроводниковыми материалами для γ -спектроскопии. Они обычно содержат различные типы ростовых дефектов, которые существенно влияют на транспортные свойства (подвижность и время жизни носителей заряда) [3]. Однако выявление и идентификация таких дефектов, а также определение их влияния на процессы генерации, рекомбинации и переноса неравновесных носителей заряда традиционными для полупроводников методами исследования затруднено из-за высокого удельного сопротивления материала. Цель данной работы — применение диэлектрических методов к исследованию и выявлению ростовых дефектов в $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

Исследовались кристаллы $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05-0.2$), выращенные при различных условиях методом вертикальной кристаллизации из расплава под высоким давлением инертного газа (до 100 атм). Форму фронта кристаллизации определяли через форму изоконцентраты Zn . Неоднородности и ростовые дефекты исследовали методом инфракрасной микроскопии и теневым методом. Остаточные напряжения ростовых дефектов в исследованных образцах определяли оптико-поляризационным методом. На противоположные грани образцов, имеющих размеры $11 \times 11 \times 2 \text{ мм}^3$ и $5 \times 5 \times 2 \text{ мм}^3$, наносились индий-галлиевые или золотые контакты. Удельное сопротивление измеряли четырехзондовым методом, а диэлектрическую проницаемость ε' и коэффициент диэлектрических потерь ε'' измеряли

в диапазоне частот $f = 10^2-10^7$ Гц по емкостной методике.

Установлено, что условия выращивания существенно влияют на форму фронта кристаллизации и обуславливают многообразие типов ростовых дефектов. Поэтому все исследованные образцы были условно разделены нами на две группы. В первую вошли кристаллы, выращенные при наименьшей кривизне фронта и содержащие лишь сравнительно мелкие пустоты и включения, а также одиночные двумерные дефекты структуры (двойники и др.). Теневые и оптико-поляризационные картины таких кристаллов свидетельствуют об их оптической однородности. В кристаллах, выращенных при большей кривизне фронта кристаллизации, наблюдаются преципитаты Te и S , трубчатые и сферические поры. Они также обладают разнообразием двумерных дефектов структуры (декорированные примесями межблочные границы, двойники и полосы скольжения) и флуктуациями состава. Ростовые дефекты, порождающие в пьезоэлектрическом кристалле неоднородные упругое и электрическое поля, характерны для второй группы образцов. Их удельное сопротивление $\rho < 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

В частотных зависимостях ε' и ε'' образцов, измеренных при подсветке из области fotocувствительности, выявлена область дисперсии релаксационного типа. Как показал анализ этих зависимостей в комплексной плоскости (с помощью диаграмм Коул–Коула), область дисперсии наиболее выражена на образцах второй группы. Она характеризуется непрерывным распределением времен релаксации, для которого свойственно уменьшение наиболее вероятного времени релаксации при увеличении интенсивности фотовозбуждения. Подобный вид частотных зависимостей ε' и ε'' характерен также для кристаллов $\text{ZnS}_{1-x}\text{Se}_x$ [4].

Сравнение фотодиэлектрического отклика кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ и исследованных ранее ZnSe позволило выявить у первых ряд особенностей. Это прежде всего большее разнообразие типов диаграмм $\varepsilon^*(\lambda)$ (см. рис. 1). Так, для наиболее высокоомных образцов первой группы характерны диаграммы наподобие отрезка прямой. При больших интенсивностях прямая на конце содержит

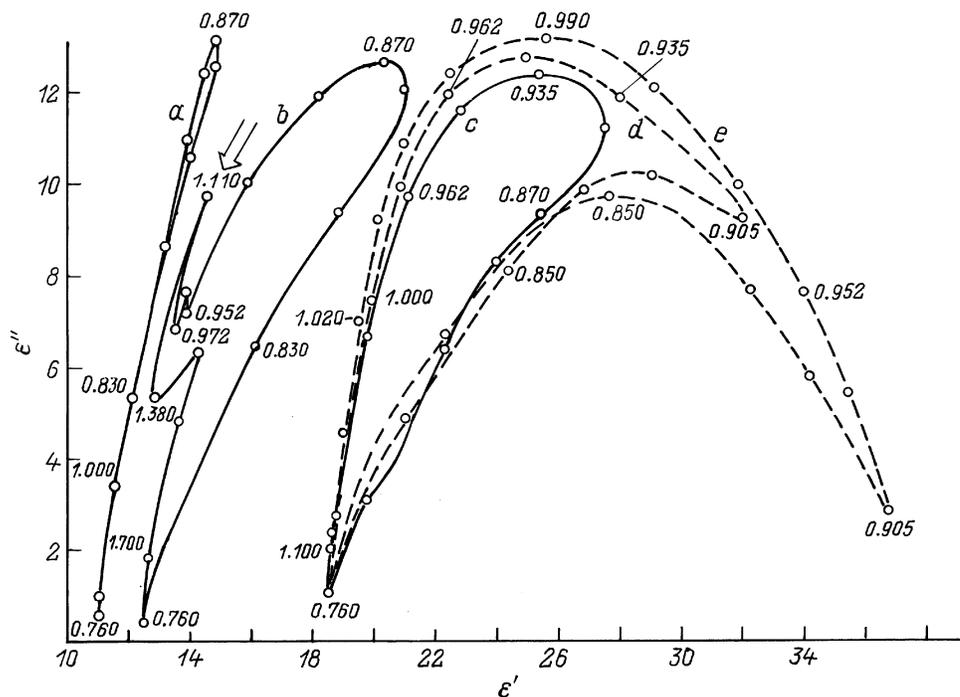


Рис. 1. Диаграммы $\varepsilon^*(\lambda)$ образцов первой группы (a) и второй группы (b-e). $f = 10^3$ Гц, температура 293 К. Указаны длины волн в мкм.

петлю (кривая a), которая свидетельствует о появлении различия спектров ε' и ε'' . Диаграммы второй группы кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ состоят из дугообразных участков. Подобный вид диаграмм наблюдался ранее на кристаллах ZnSe [1]. Установлено, что количество дуг, степень их выраженности и площадь диаграмм явно коррелируют с плотностью тех ростовых дефектов, которые создают остаточные напряжения. Отметим, что диаграммы $\varepsilon^*(\lambda)$ индивидуальны для каждого отдельного кристалла. При этом наиболее оптически однородные образцы этой группы характеризуются меньшим количеством дуг и меньшей площадью диаграмм.

Диаграммы $\varepsilon^*(\lambda)$ других кристаллов второй группы имеют более сложный вид. Во-первых, диаграммы $\varepsilon^*(\lambda)$, полученные на ряде образцов, содержат как бы обособленные частные диаграммы, очевидно, отображающие вклад изолированных сложных центров фоточувствительности (см. рис. 1, стрелка на кривой b). Таких частных диаграмм может быть несколько, и они хорошо воспроизводятся при повторных измерениях. При этом полосы $\varepsilon'(\lambda)$ и $\varepsilon''(\lambda)$, соответствующие этим обособленным участкам диаграмм, как правило, практически одинаковы. Во-вторых, в наиболее фоточувствительных образцах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ при повышении интенсивности света происходит не только изменение величин приращения ε' и ε'' на свету, что характерно, например, для ZnSe , но и существенное изменение формы диаграммы (см. рис. 1, кривые c-e). При этом с увеличением интенсивности света ε' растет, а ε'' проходит через максимум.

Важно также отметить, что форма диаграммы (количество дуг, площадь, диапазоны приращений ε' и ε'' , проявление обособленных частных диаграмм и т.д.) в каждом конкретном случае зависит от размеров и координаты светового зонда. Это наводит на мысль о связи выявленных особенностей диаграмм $\varepsilon^*(\lambda)$ со сложным неоднородным распределением ростовых дефектов, упругие поля которых перекрываются. Для проверки этого предположения были проведены измерения ε' и ε'' при сканирующем освещении световым зондом шириной 100 мкм на длине волны вблизи собственного максимума. Действительно, полученные координатные зависимости $\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ содержат ряд локальных экстремумов, количество и распределение которых являются индивидуальными характеристиками кристалла (рис. 2, кривые 1, 2). Оказалось также, что характер распределений $\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ изменяется с ростом интенсивности света. При ее увеличении происходит сложная перестройка экстремумов: некоторые из них увеличиваются, а другие уменьшаются вплоть до инверсии (рис. 2, кривые 3, 4). Отметим, что уровень остаточных напряжений в образцах второй группы выше, что можно связать с большей плотностью ростовых дефектов и перекрытием их упругих полей.

Все перечисленные выше особенности фотодиэлектрического отклика кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ указывают на тесную связь распределения релаксаторов с упругими и электрическими полями ростовых дефектов. Исходя из этого предположения можно объяснить индивидуальный характер диаграмм $\varepsilon^*(\lambda)$ и особенности зависимостей $\varepsilon'(x)$, $\varepsilon''(x)$. При этом экстремумы на распределениях

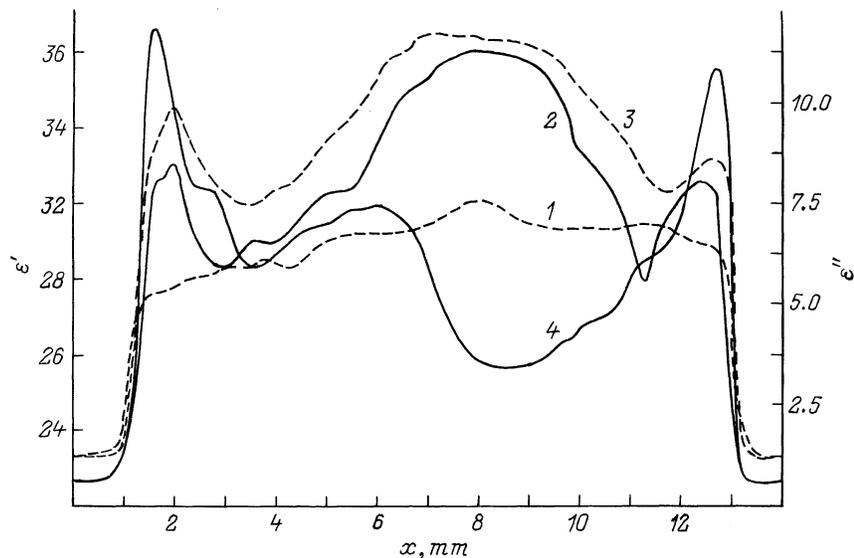


Рис. 2. Зависимости $\varepsilon'(x)$ (1, 3) и $\varepsilon''(x)$ (2, 4) образцов второй группы. $f = 10^3$ Гц, температура 293 К.

$\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ естественно связывать с зональным характером распределения ростовых дефектов. Это подтверждают результаты оптико-поляризационных и теневых исследований. Изучение природы сложных центров, порождающих обособленные частные диаграммы (рис. 1, кривая *b*), требует специальных исследований. Для этих образцов зависимости $\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ свидетельствуют об однородном характере распределения этих сложных центров по образцу.

Изменение формы диаграмм $\varepsilon''(\lambda)$, наблюдавшееся на образцах второй группы при увеличении интенсивности света, по-видимому, связано с перераспределением вкладов, вносимых неравновесными носителями в сквозную проводимость и поляризацию при изменении интенсивности фотовозбуждения. Очевидно, заполнение крупномасштабного потенциального рельефа неравновесными носителями заряда в данных кристаллах сопровождается самосогласованным изменением распределения упругого и электрического полей. Это подтверждает характер изменения распределений $\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ с ростом интенсивности. При этом перераспределение указанных вкладов и приводит к выявленным особенностям диаграмм $\varepsilon^*(x)$, характер которых определяется доминирующим типом и плотностью ростовых дефектов. Можно предположить, что при больших концентрациях неравновесных носителей заряда именно упругие поля ростовых дефектов, порождающие в пьезоэлектрическом кристалле крупномасштабные флуктуации потенциала, оказывают доминирующее влияние на транспортные свойства и определяют возможность достижения необходимого для детекторов γ -излучения качества данных кристаллов.

Таким образом, взаимосвязь упругого и электрического полей, создаваемых ростовыми дефектами и флуктуациями состава, приводит к особенностям диэлектрической релаксации кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Сложное, индивидуальное для каждого кристалла, распределение этих дефектов по объему обуславливает специфику диаграмм $\varepsilon^*(\lambda)$ для каждого отдельного образца, что позволяет проводить на их основе идентификацию кристаллов. Зависимости $\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ отражают характер распределения ростовых дефектов, что особенно важно для кристаллов, которые не прозрачны в видимом диапазоне спектра. Кроме того, анализируя характер локального изменения $\varepsilon'(x)$ и $\varepsilon''(x)$ при увеличении интенсивности фотовозбуждения, можно разделить некоторые типы ростовых дефектов. Полученные результаты положены в основу методики идентификации ростовых дефектов и диагностики качества данных кристаллов.

Список литературы

- [1] Ю.А. Загоруйко, В.К. Комарь, В.П. Мигаль, О.Н. Чугай. ФТП, **29** (6), 1065 (1995).
- [2] Ю.А. Загоруйко, В.К. Комарь, В.П. Мигаль, О.Н. Чугай. Функцион. материалы, **1** (2), 135 (1994).
- [3] V. Komar, A. Gektin, D. Nalivaiko, I. Klimentenko, V. Migal, O. Panchuk, A. Rybka. *11th Int. Workshop on Room Temperature Semiconductor X- and Gamma-Ray Detectors and Associated Electronics* (Vienna, 1999) p. 8.
- [4] В.П. Мигаль, А.Л. Рвачев, О.Н. Чугай. ФТП, **19** (8), 1517 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of elastic fields of as-grown defects on the photodielectric response of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals

I.A. Klimenko, V.K. Komar*, V.P. Migal, D.P. Nalivaiko*

State Aerospace University "KhAI",
61070 Kharkov, Ukraine

*STS Institute for Single Crystals,
National Academy of Sciences of Ukraine,
61001 Kharkov, Ukraine

Abstract It is shown that dielectric function diagrams $\varepsilon^*(\lambda)$ of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals grown from the melt have some peculiarities, that have not been observed on other $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ crystals. It is found that these peculiarities correlate with a variety of as-grown defects and influence due to elastic and electric fields on photodielectric properties.