

Фотоэлектрические сигнатуры кристаллов CdZnTe

© А.В. Бут[¶], В.П. Мигаль, А.С. Фомин

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ“,
61070 Харьков, Украина

(Получена 14 января 2009 г. Принята к печати 2 февраля 2009 г.)

Для выявления распределения явных и скрытых электрически активных дефектов различного типа и разного масштаба, влияющих на фотоотклик твердых растворов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05-0.2$), предложено сопоставление локальных фотоэлектрических сигнатур $U-I(y)_{f,\lambda}$ различных участков образца (U — тестирующее напряжение, I — фототок, y — координата, λ — длина волны, f — частота тестирующего сигнала), в то время как для поиска локальных неустойчивостей фотоотклика наиболее подходят совокупности интегральных сигнатур $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$. Впервые показано, что многомасштабность и согласованность полей дефектов и воздействующего поля порождает спектральные особенности фотоотклика (перестройку спектров, проявление скрытых полос фоточувствительности), которые наиболее полно и интегративно отображаются на сигнатурах спектров фототока $I(\lambda)-dI/d\lambda$.

PACS: 71.23.An, 71.55.Gs, 72.40.+w

Сигнатурный анализ, основанный на сравнении сигнатур характеристик исследуемого объекта с эталонными, на сегодняшний день достаточно широко применяется для контроля работоспособности и диагностики неисправностей многокомпонентных узлов и элементов современной микроэлектроники, а также идентификации биообъектов, компьютерных вирусов и т.п. [1]. Он позволяет оперативно, не вникая в физическую природу дефектов, получить однозначные результаты контроля. Этот метод представляет несомненный интерес для экспресс-диагностики и подбора сенсорных кристаллов, полученных в существенно неравновесных условиях. При этом возникающие при росте крупногабаритных буль термодинамические градиенты приводят не только к возникновению дефектов различного типа и разного масштаба, но и к их естественной самоорганизации [2]. Поэтому для кристаллов CdZnTe характерно пространственно неоднородное распределение электрически активных дефектов различного типа и разного масштаба [3]. Они обуславливают искажение фотоотклика, что, как правило, проявляется в экстремальных условиях или же при определенном сочетании внешних и внутренних факторов, порождая ряд взаимосвязанных проблем исследования (локальной неустойчивости, артефактов фотоотклика и т.п.) и контроля при обработке кристаллов. Их решение требует поиска новых подходов, а также привлечения методов и идей из смежных областей науки и техники. Поэтому основной целью данной работы являлось исследование возможностей сигнатурного анализа характеристик применительно к решению проблем выходного контроля сенсорных кристаллов CdZnTe.

Исследовались кристаллы $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05-0.2$), выращенные из расплава при различных условиях модифицированным методом Бриджмена вертикальной кристаллизации [3]. Удельное сопротивление исследуемых образцов, имеющих форму прямоугольного параллеле-

пипеда с размерами $6 \times 6 \times 3$ мм или $11 \times 11 \times 2$ мм, находилось в пределах $\rho \sim 10^{10} - 10^{11}$ Ом·см. На противоположные наибольшие грани образцов наносились золотые контакты. На дисплее персонального компьютера наблюдались фазовые траектории, являющиеся локальными фотоэлектрическими сигнатурами $U-I(y)_{f,\lambda}$ (U — тестирующее напряжение, I — фототок), полученные с помощью анализатора сигнатур при автоматическом перемещении образца вдоль координаты y со скоростью 0.5–10 мм/мин относительно светового зонда шириной $\Delta s = 50-500$ мкм и заданной частоте тестирующего поля f , а также длине волны λ . Частота внешнего поля напряженностью $10^2-2 \cdot 10^2$ В/см находилась в диапазоне $f = 0.1-2 \cdot 10^4$ Гц. Для выявления локальных неустойчивостей фотоэлектрических характеристик применялись интегральные фотоэлектрические сигнатуры $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$, полученные в циклическом режиме. Спектры фототока $I(\lambda)_f$ кристаллов измерялись в автоматическом режиме. Посредством периодической последовательности импульсов в форме двуполярного меандра осуществлено многочастотное внешнее воздействие.

Для кристаллов CdZnTe характерно многообразие локальных сигнатур $U-I(y)_{f,\lambda}$, большинство из которых подобно сигнатурам нелинейной емкости. Они зависят от координаты y и ширины светового зонда Δs , а также от частоты f внешнего тестирующего напряжения U . Оказалось, что влияние неоднородного распределения электрически активных дефектов кристалла отчетливо проявляется на последовательностях локальных сигнатур $U-I(y)_{f,\lambda}$, которые являются своеобразными пакетами сигнатур, полученными при сканировании световым зондом участков образца одинаковой ширины (рис. 1, пакеты сигнатур $a-c$). При этом пакет сигнатур для наиболее функционально пригодного участка кристалла принимается за эталон (рис. 1, a), при сравнении с которым учитываются характер изменения формы и охватываемая площадь. Расхождение фазовых траекторий при определенных y и $U = U_{cr}$ указывает на зарождение и

[¶] E-mail: khai_physical_lab@xai.edu.ua

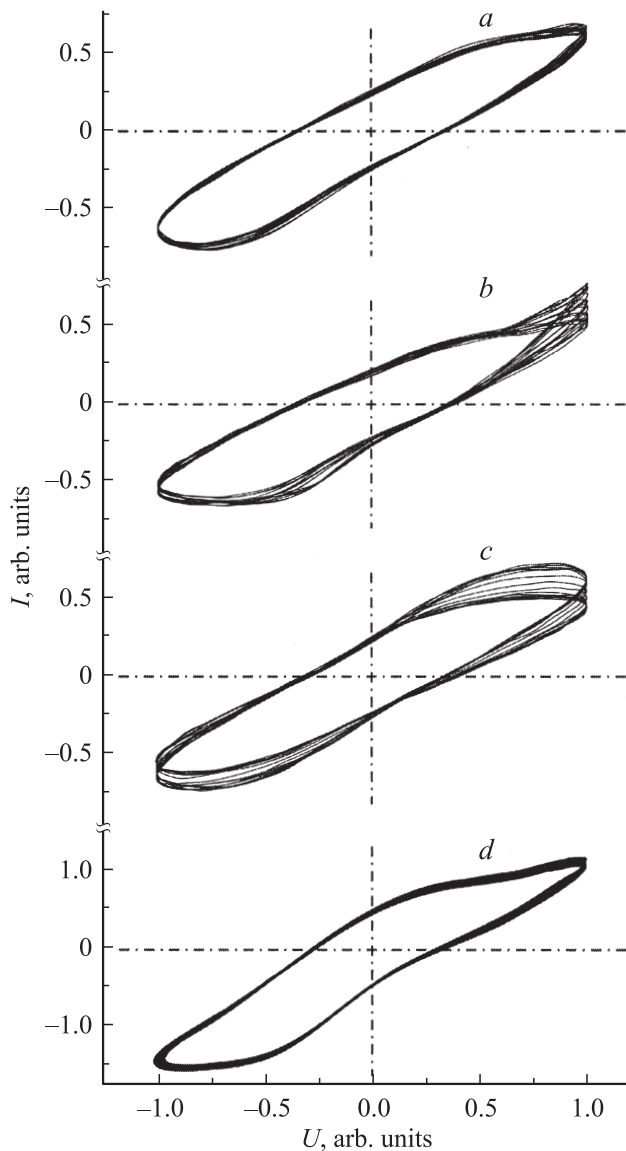


Рис. 1. Пакеты фотоэлектрических сигнатур кристалла при $\lambda = 860$ нм и $f = 1$ Гц: (a, b, c) — пакеты локальных сигнатур $U-I(y)_{f,\lambda}$ при $y = 1-1.5$ (a), $2.5-3$ (b), $4-4.5$ мм (c) и $\Delta s = 100$ мкм; d — пакет интегральных сигнатур $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$ при $y = 0-6$ мм.

развитие локальной неустойчивости. При этом точка начала расхождения фазовых траекторий в пакете, индуцированных определенным напряжением U_{cr} , а также их плотность индивидуальны для каждого участка образца. Очевидно, что характер распределения локальных сигнатур $U-I(y)_{f,\lambda}$ в пакете как подмножества замкнутых фазовых траекторий отображает особенности динамики фотоэлектронных процессов.

С другой стороны, многообразие зависимостей локальных сигнатур от частоты f тестирующего напряжения U , а также от длины волны λ светового зонда свидетельствуют о пространственно неоднородном распределении плотности фототока $I_{f,\lambda}$ через кристалл

и нелинейности отклика. Очевидно, этим объясняется исчезновение одних и возникновение других локальных особенностей сигнатур при изменении ширины Δs светового зонда от 50 мкм до ширины пакета (200 и более мкм). Поэтому интегральные сигнатуры $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$, полученные при фотовозбуждении всего образца, индивидуальны (рис. 1, сигнатуры d). Они сложны и многообразны по форме, а некоторые из них фрагментарно подобны сигнатурам различных элементов и цепей электронной техники (диодов, варикапов, индуктивностей, RL - и RC -контуров и т.п.), имеющих в базе данных анализатора сигнатур. С одной стороны, фотоэлектрические сигнатуры функциональных характеристик дают возможность определять критические внешние воздействия (U_{cr} , интенсивность фотовозбуждения, температуру и т.п.), при которых начинают проявляться скрытые локальные особенности фотоотклика. С другой стороны, не только форма этих сигнатур, но и площадь, которую они охватывают, кривизна и длина дугообразных участков, их количество, а также степень асимметрии формы противоположных квадрантов являются характеристическими признаками, которые позволяют упростить процедуру поиска функционально подобных образцов или сенсоров на их основе. В частности, наблюдаемое многообразие интегральных сигнатур позволяет использовать их как эффективный способ экспресс-контроля для отбора функционально пригодных образцов. При этом характер изменения плотности фазовых траекторий с напряжением U_{cr} предоставляет новые возможности для исследования кристаллов и определения режимов, а также параметров их обработки. Отметим эффективность сопоставительного анализа пакетов сигнатур при контроле результатов акустической обработки кристаллов [4].

Многообразие видов интегральных сигнатур $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$, наблюдаемое при изменении длины волны фотовозбуждения, и характер их трансформации с увеличением частоты внешнего поля указывают на сложность энергетического спектра дефектов. В частности, это подтверждает анализ спектров фототока CdZnTe с помощью вейвлета Хаара, на основе которого показано, что фотоэлектронные процессы протекают на разных масштабных уровнях [5]. Об этом также свидетельствует характер изменений спектров фототока кристаллов CdZnTe при дополнительном смещении П-образными импульсами различного знака и различной длительности [6]. Очевидно, в рельефе внутренних полей доминируют ступеньки и П-образные экстремумы различного знака и разного масштаба. Для проверки этой гипотезы были проведены исследования влияния формы внешнего периодического поля на спектры фототока CdZnTe. Действительно, изменение внешнего напряжения U с гармонического (одночастотного) (рис. 2, кривые 1, 3) на негармоническую периодическую последовательность импульсов (в форме двуполярного меандра, характеризуемого многочастотным фурье-спектром) изменяет спектр стационарного фототока (рис. 2, кривые 2, 4). Сравнение этих спектров фототока показывает, что негармоничес-

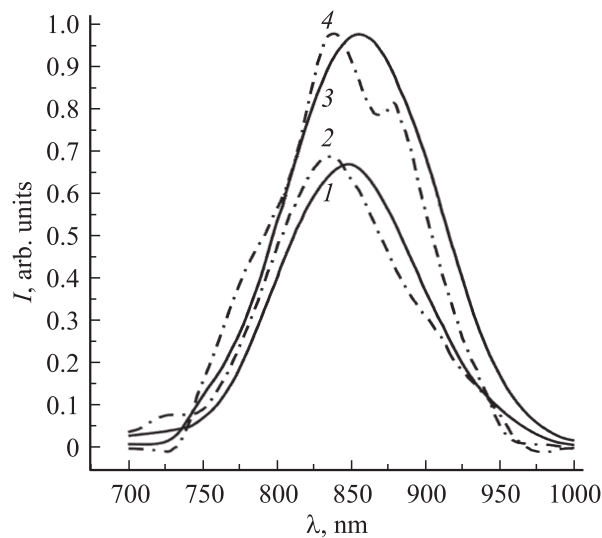


Рис. 2. Спектры фототока $I(\lambda)_f$ при гармоническом (сплошная линия) и негармоническом (штрихпунктирная) внешних воздействиях на частотах $f=1$ кГц (1, 2), 10 кГц (3, 4), в диапазоне длин волн $\lambda = 700-1100$ нм.

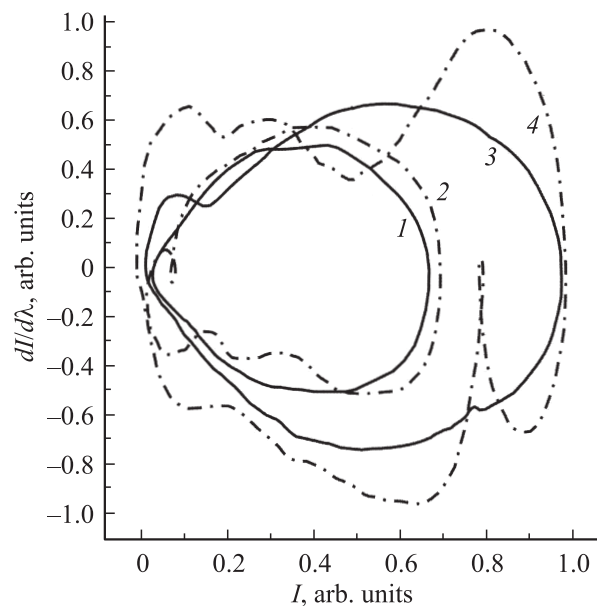


Рис. 3. Сигнатуры спектров фототока $I(\lambda)-dI/d\lambda$ при гармоническом (сплошная линия) и негармоническом (штрихпунктирная) внешних воздействиях на частотах $f = 1$ кГц (1, 2) и 10 кГц (3, 4).

кое внешнее воздействие расширяет спектр и приводит к выделению скрытых полос фоточувствительности. Очевидно, это обусловлено наличием такого набора гармоник в фурье-спектре двуполярного меандра, которые в нелинейном кристалле могут одновременно индуцировать ряд фотозлектронных процессов на различных масштабных уровнях. Действительно, с увеличением частоты следования импульсов происходит перестройка зависимостей $I(\lambda)_f$ во всем спектральном

диапазоне. Ее характер наиболее полно отображают спектры фототока, представленные в параметрическом виде $I(\lambda)-dI/d\lambda$ [7]. Они индивидуальны для каждого образца, по сути являются параметрическими сигнатурами спектров фототока и представляют собой замкнутую последовательность дугообразных участков различной длины и кривизны (рис. 3, кривые 2, 4). Как следует из рис. 3, на них более отчетливо видны отдельные спектральные составляющие фотоотклика.

Площадь, охватываемая сигнатурой $I(\lambda)-dI/d\lambda$, в рамках обобщенной релаксационной модели [8] отображает мощность подмножества состояний образца, индуцированных фотозлектрическим воздействием. Характер изменений площади и формы сигнатур с частотой говорит о перераспределении фотоиндуцированных состояний между различными спектральными составляющими. На это указывает изменение количества дугообразных участков, их длины и кривизны (рис. 3, кривые 2, 4). Эти результаты хорошо согласуются с результатами вейвлет-анализа спектров фототока данных кристаллов [5]. Можно предположить, что характер перераспределения вкладов между отдельными спектральными составляющими фотоотклика при многочастотном воздействии определяется неоднородным распределением релаксаторов по частотам. Действительно, экспериментальные результаты, приведенные в [9], указывают на индуцированную внешним воздействием перестройку внутренних упругих и электрических полей, порожденных в пьезозлектрическом кристалле дефектами различного типа и разного масштаба, а также флуктуациями состава.

Таким образом, впервые показано, что для выявления электрически активных дефектов различного типа и разного масштаба в кристаллах CdZnTe эффективен анализ локальных сигнатур $U-I(y)_{f,\lambda}$ в пакете. Локальные неустойчивости фотоотклика отчетливо проявляются на совокупностях интегральных сигнатур $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$, полученных в одинаковых условиях. При этом согласование масштабов полей дефектов и воздействующего поля порождает тонкие спектральные особенности фотоотклика, которые наиболее полно и интегративно отображаются на сигнатурах спектров фототока $I(\lambda)-dI/d\lambda$. Следовательно, предложенные фотозлектрические сигнатуры существенно упрощают выходной контроль при обработке кристаллов CdZnTe и особенно — входной при изготовлении на их основе сенсоров объемом 1 см^3 и более.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.

Список литературы

- [1] S. Bergmann, J. Ihmels, N. Barkai. Phys. Rev. E, **67**, 031902 (2003).
- [2] Ю.Д. Третьяков, Н.Н. Олейников, Е.А. Гудилин, А.А. Вертел, А.Н. Баранов. Неорг. матер., **30** (3), 29 (1994).

- [3] V. Komar, A. Gektin, D. Nalivaiko, I. Klimenko, V. Mygal, O. Panchuk, A. Rybka. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **458** (1–2), 113 (2001).
- [4] В.П. Мигаль, И.А. Клименко, А.С. Фомин, С.В. Сулима, О.Н. Чугай. Патент 62757А Украина, МКІ 7Н01L21/00, Н01L21/263; Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ“ — № 2003054443; Заявл. 19.05.2003. Оpubл.: 15.12.2003, Бюл. № 12, с. 3.
- [5] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Письма ЖТФ, **32** (11), 44 (2006).
- [6] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Функциональные матер., **13** (2), 233 (2006).
- [7] В.К. Комарь, В.П. Мигаль, А.С. Фомин. ФТП, **40** (2), 133 (2006).
- [8] В.П. Мигаль. ФТП, **35** (10), 1188 (2001).
- [9] И.А. Клименко, В.К. Комарь, В.П. Мигаль, Д.П. Наливайко. ФТП, **35** (2), 139 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoelectrical signatures of CdZnTe crystals

A.V. But, V.P. Migal', A.S. Fomin

A.V. Zhukovsky National Aerospace University „KhAI“,
61070 Kharkov, Ukraine