

# Спектры фототока твердых растворов CdZnTe в параметрическом виде и их дискретное вейвлет-разложение

© А.В. Бут<sup>¶</sup>, В.П. Мигаль, А.С. Фомин

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
61070 Харьков, Украина

(Получена 11 сентября 2008 г. Принята к печати 18 сентября 2008 г.)

Показано, что посредством дискретного вейвлет-разложения возможно осуществить преобразование спектра фототока  $I(\lambda)$  твердых растворов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  ( $x = 0.1-0.2$ ) в индивидуальные подмножества аппроксимирующих  $C_a$  и детализирующих  $C_d$  коэффициентов, распределение которых весьма чувствительно к локальным возмущениям фотоотклика на разных масштабных уровнях. Представление этих подмножеств в виде параметрических вейвлет-сигнатур  $C_d = f(C_a)$  дало возможность осуществить переход из информационного пространства вейвлет-коэффициентов в динамическое пространство фотоиндуцированных состояний. Анализ изменения конфигураций  $C_d = f(C_a)$  и площадей, которые они охватывают на каждом масштабном уровне при циклических измерениях спектра фототока, позволил выявить в них скрытые обратимые и необратимые локальные изменения.

PACS: 43.60.Hj, 71.23.An, 71.55.Gs, 72.40.lw

## 1. Введение

Существенно неравновесные условия роста крупногабаритных буль кристаллов  $A^{II}B^{VI}$  приводят к возникновению многообразия дефектов структуры различного типа и масштаба, а также к их естественной самоорганизации [1]. Следствием этого является ряд взаимосвязанных проблем (стабильности, устойчивости, памяти и др.) сенсоров на основе кристаллов CdZnTe, а также спектральные и другие артефакты, которые проявляются как правило, при определенном сочетании внешних и внутренних факторов или в экстремальных условиях. Они свидетельствуют о том, что кристалл как объект исследования является нелинейной динамической системой, для которой устойчивость характеристик, обратимость и воспроизводимость свойств и параметров являются нерешенными проблемами. В обычных условиях исследования индивидуальные особенности процессов переноса, накопления и рекомбинации неравновесных носителей заряда проявляются в тонких, порой незаметных, изменениях различных параметров и характеристик кристаллов. При этом их выявление и анализ весьма затруднительны и неоднозначны. В частности, анализ спектральных зависимостей фототока (ФТ)  $I = f(\lambda)$  не позволяет выявлять тонкие локальные особенности исследуемых характеристик. С другой стороны, автоматизация и компьютеризация исследований позволила преобразовать спектры фототока CdZnTe  $I = f(\lambda)$  в диаграммы  $I(\lambda) - dI/d\lambda$ , которые представляют собой спектры в параметрическом виде [2]. Они достаточно хорошо отображают индивидуальные особенности спектра ФТ кристаллов, связанные с дефектообразованием при росте, технологической обработке или вследствие фотоактивной предыстории. При этом увеличение частоты выборки сигнала на порядок и более позволило осуществить вейвлет-анализ спектров ФТ кристаллов CdZnTe,

выявить многомасштабность фотоотклика и получить качественно новую информацию, однозначная физическая интерпретация которой, однако, затруднена [3]. Это в свою очередь не позволяет решить взаимосвязанные проблемы оптимизации роста кристаллов, их послекристаллизационных обработок, устойчивости характеристик в экстремальных условиях, выявления статистически значимых обратимых и необратимых изменений свойств кристаллов  $A^{II}B^{VI}$ . Возможность их решения мы видим в дальнейшем развитии информационного подхода к исследованию функциональных материалов, основанного на выявлении и анализе более тонких особенностей спектров ФТ, разрешение которых возможно посредством дискретного вейвлет-приобразования, что и являлось основной целью данной работы.

## 2. Образцы и методы исследования

Исследовались кристаллы  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  ( $x = 0.1-0.2$ ), выращенные из расплава при различных условиях модифицированным методом Бриджмена вертикальной кристаллизации [4]. Удельное сопротивление исследуемых образцов, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда с размерами  $5 \times 5 \times 2$  и  $11 \times 11 \times 2$  мм, находилось в пределах  $\rho \approx 10^{10} - 10^{11}$  Ом·см. На противоположные наибольшие грани образцов наносились золотые контакты. Циклические измерения спектров ФТ  $I = f(\lambda)$  кристаллов производили в диапазоне длин волн 600–1100 нм в поле с напряженностью  $10 - 2 \cdot 10^2$  В/см с помощью электрометрического преобразователя на основе операционного усилителя AD795 (Analog Devices). Оцифровка сигнала производилась с частотой выборки  $10^3 - 10^5$  Гц посредством промышленной системы сбора данных ADVANTECH PCI-1711L с дальнейшей обработкой на персональном компьютере. Дефекты структуры различного типа и масштаба выявляли методами травления, инфракрасной и оптико-

<sup>¶</sup> E-mail: khai\_physical\_lab@xai.edu.ua

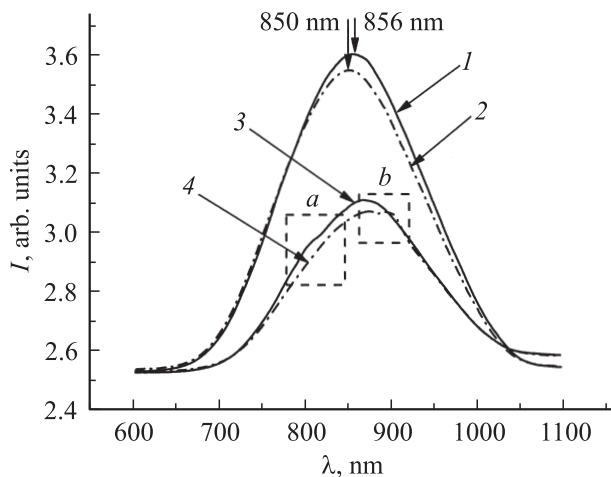
поляризационной микроскопии, модифицированным теневым методом [4].

Для выявления обратимых и необратимых изменений фотоэлектрических свойств и индивидуальных особенностей спектров ФТ всех исследуемых кристаллов CdZnTe оказалось достаточным 8–12 циклов измерений в одинаковых условиях.

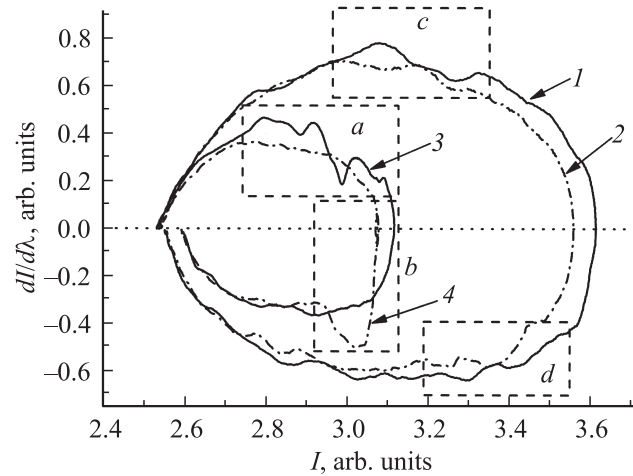
### 3. Результаты и обсуждение

По характеру индивидуальных изменений спектров ФТ все образцы были условно разделены на две группы. Для образцов первой группы после каждого сканирования спектра наблюдалось уменьшение величины ФТ, которое заканчивалось через 8–10 циклов измерений. Изменения формы спектра  $I = f(\lambda)$  при увеличении напряженности смещающего электрического поля в образцах этой группы не выявлено. Однако для ряда образцов многократное сканирование спектра в одинаковых условиях сопровождалось незначительным смещением максимума ФТ в коротковолновую область. Как правило, оно не превышало 3–6 нм (рис. 1, кривые 1, 2) и, очевидно, связано с уменьшением вклада сильноинерционной компоненты ФТ от цикла к циклу. На это указывает уменьшение величины смещения при увеличении времени сканирования спектра, а также полное восстановление спектральных характеристик ФТ после длительного, более двенадцатичасового пребывания образцов в темноте. Отметим, что образцы этой группы оказались наиболее структурно совершенными и оптически однородными.

Характерной особенностью спектров  $I = f(\lambda)$  образцов второй группы является плавная, а порой и скачкообразная их перестройка (рис. 1, области *a*, *b*). Так, в определенных диапазонах длин волн было выявлено постепенное исчезновение одних локальных возмущений



**Рис. 1.** Спектральные зависимости фототока  $I = f(\lambda)$  образцов первой и второй групп для 1-го и 10-го сканирований, кривые 1, 2 и 3, 4 соответственно.

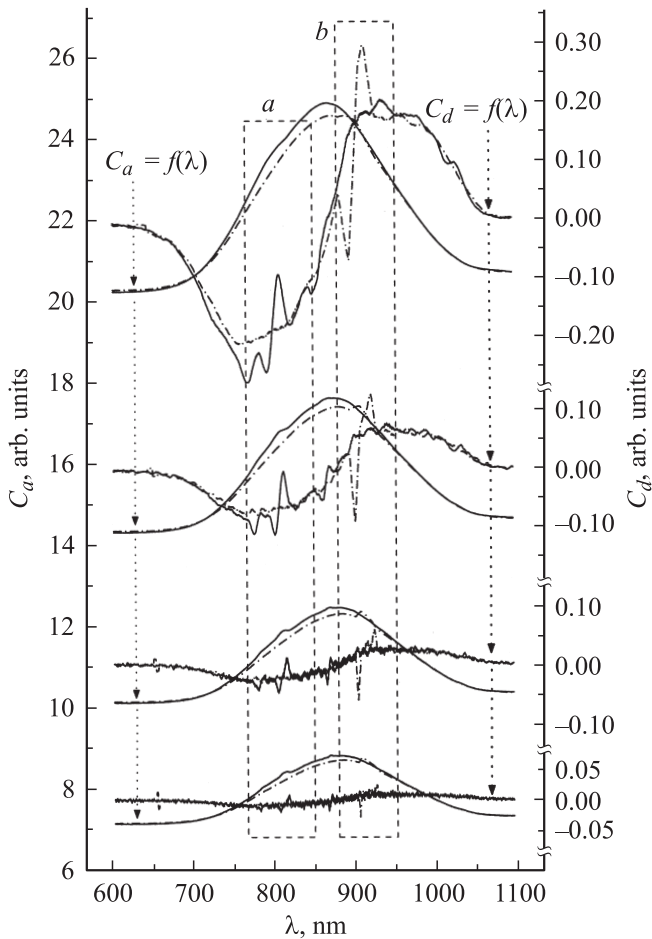


**Рис. 2.** Спектры фототока  $I = f(\lambda)$  образцов первой и второй групп в параметрическом виде  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  для 1-го и 10-го сканирований, кривые 1, 2 и 3, 4 соответственно.

спектров ФТ (рис. 1, кривая 3, область *a*) и появление других (рис. 1, кривая 4, область *b*). При этом после каждого цикла измерений возникала остаточная проводимость, которая релаксировала в течение 5–30 мин.

Кроме того, для образцов второй группы характерны: а) зависимость формы спектров  $I = f(\lambda)$  от времени сканирования и напряженности смещающего электрического поля; б) индивидуальное количество циклов измерения, необходимых для завершения перестройки спектра; в) неполное восстановление спектральных зависимостей ФТ после длительного (более 12 ч) пребывания в темноте. Все это свидетельствует не только об их связи с дефектами различного типа и масштаба, но и с одновременным действием совокупности различных факторов и процессов (флуктуации состава, перестройки упругих и электрических полей, порождаемых дефектами в пьезоэлектрическом кристалле, перезарядкой сложных центров fotocувствительности, фотополяризационными процессами и др.). На это, в частности, указывают как спектры ФТ в параметрическом виде  $I(\lambda) - dI/d\lambda$ , содержащие индивидуальные последовательности дугообразных участков различной кривизны (рис. 2), так и характер их изменения в процессе циклических измерений спектра. Действительно, уменьшение количества дугообразных участков диаграмм  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  и площади, которую они охватывают, указывает на постепенное завершение процессов перестройки спектра и установление более устойчивых характеристик кристалла.

Для всех образцов диаграммы  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  являются индивидуальными графическими образами спектров ФТ в пространстве фотоиндуцированных состояний. По существу они являются параметрическими сигнатурами, которые интегративно отображают многообразие взаимосвязанных фотоиндуцированных состояний. Поэтому для выявления индивидуальных особенностей сигнатур  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  пригодны различные методики сигнатурного



**Рис. 3.** Зависимости коэффициентов  $C_a$  и  $C_d$  от длины волны фотовозбуждения  $\lambda$  на первых четырех уровнях вейвлет-разложения спектров фототока образца второй группы. Номер уровня  $i$  увеличивается снизу вверх.

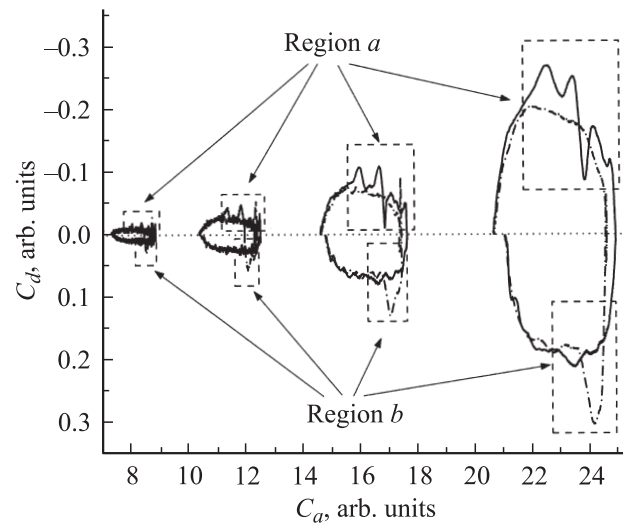
анализа, применение которых в различных областях науки и техники расширяется [5].

Для параметрических сигнатур  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  спектров ФТ образцов первой группы (рис. 1, кривая 1,2) характерны дугообразные участки с малой кривизной, количество которых мало изменяется от цикла к циклу. Наблюдается также относительно небольшое уменьшение площади сигнатуры в рамках существующих границ, с которым связано смещение некоторых дугообразных участков (рис. 2, область  $c, d$ ). В то время как для образцов второй группы (рис. 1, кривая 3,4) характерно существенное изменение конфигурации сигнатур  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  (рис. 2, область  $a, b$ ) от цикла к циклу. Это проявляется в уменьшении количества дугообразных участков и их кривизны, появлении новых участков, которые выходят за предыдущие границы сигнатуры  $I(\lambda) - dI/d\lambda$ . Характер изменения спектров ФТ свидетельствует о том, что фотоотклик твердых растворов CdZnTe обладает не только грубой, но и более тонкой структурой. Для ее выявления нами применялось дискретное вейвлет-преобразование спектров ФТ по базису вейвлета Хаара,

элементы которого хорошо локализованы, а подвижное частотно-временное окно дает возможность „сканирования“ сигнала одновременно в частотной и временной областях [3,6].

Действительно, преобразовывая исследуемый сигнал с помощью набора цифровых фильтров с изменяемой импульсной характеристикой, имеем возможность осуществлять спектральный анализ локальных возмущений сигнала фотоотклика при сохранении высокого разрешения как по длине волны (времени сканирования), так и по масштабу (частоте) [6]. При этом каждый масштабный уровень вейвлет-разложения спектра ФТ соответственно характеризуется индивидуальными подмножествами коэффициентов аппроксимации  $C_a$  и детализации  $C_d$ .

Разложение исследуемых спектров ФТ по различным масштабным уровням на аппроксимирующие коэффициенты  $C_a$  с помощью дискретного вейвлет-преобразования по Хаару подобно их численному интегрированию с различным шагом. В то время как разложение на детализирующие коэффициенты  $C_d$  подобно их дифференцированию (рис. 3). На зависимостях  $C_a$  и  $C_d$  от длины волны  $\lambda$  на четырех уровнях вейвлет-разложения спектров ФТ в областях  $a$  и  $b$  (рис. 3) хорошо видно, что локальные возмущения трансформируются при увеличении уровня разложения. Это позволяет выявлять и качественно анализировать изменения составляющих отклика на каждом масштабном уровне. Для перехода к количественным показателям разработан алгоритм параметрического представления спектров ФТ в виде разномасштабных наборов  $C_a$  и  $C_d$ , т.е.  $C_d = f(C_a)$  (рис. 4). Диаграммы  $C_d = f(C_a)$  представляют собой последовательности дугообразных участков различной кривизны, которые охватывают определенные площади. Подобие диаграмм  $C_d = f(C_a)$  на четвертом уровне



**Рис. 4.** Вейвлет-сигнатуры  $C_d = f(C_a)$  спектров фототока образца второй группы на первых четырех уровнях разложения по базису вейвлета Хаара. Номер уровня  $i$  увеличивается слева направо.

Отношение площадей для вейвлет-сигнатур на четырех уровнях разложения

Отношение площадей для вейвлет-сигнатур	Уровень разложения $i$	Значение $S_i/S_{i-1}$
1-й цикл сканирований	2	3.8
	3	3.92
	4	3.948
10-й цикл сканирований	2	3.629
	3	3.828
	4	3.878

разложения (рис. 4) с диаграммами  $I(\lambda)-dI/d\lambda$  (рис. 2) позволяет рассматривать их как вейвлет-сигнатуры спектров ФТ. Их конфигурация для образцов первой группы не изменяется при циклических измерениях, а охватываемая площадь восстанавливается на всех уровнях разложения после пребывания образцов в темноте, т.е. изменения характеристик на всех масштабных уровнях обратимы.

Для образцов второй группы характерна перестройка конфигурации сигнатур как на каждом масштабном уровне, так и при переходе из одного уровня на другой. С увеличением уровня разложения  $i$  изменяются кривизна и длина дугообразных участков (рис. 4, область  $a, b$ ), а также площадь  $S_i$  сигнатур (см. таблицу). Поскольку площадь сигнатур можно рассматривать как мощность подмножеств фотоиндуцированных состояний [7], можно утверждать, что в образцах второй группы происходят необратимые изменения, которые можно оценивать и интерпретировать в рамках разных моделей.

Так, из анализа отношения площадей  $S_i/S_{i-1}$  (см. таблицу) соседних вейвлет-сигнатур видно, что в процессе циклических измерений происходит перераспределение мощностей фотоиндуцированных состояний между различными масштабными уровнями, которое, очевидно, и обуславливает необратимые изменения свойств. Это подтверждают аналогичные изменения вейвлет-сигнатур после термической и акустической обработок.

Отметим, что не только спектральные, но и временные, пространственные и другие характеристики кристалла можно преобразовать в вейвлет-сигнатуры и тем самым проводить их сопоставительный анализ посредством сравнения конфигурации и отношения площадей. Более того, не только подмножество фотоиндуцированных состояний, но и операции над ними и их отношения позволяют осуществлять сравнительный количественный анализ необратимых изменений фотоэлектрических свойств кристаллов при обработке или эксплуатации.

#### 4. Заключение

Применение дискретного вейвлет-преобразования спектров ФТ и последующая их трансформация в вейвлет-сигнатуры позволяет перейти к индивидуальным

подмножествам аппроксимирующих  $C_a$  и детализирующих  $C_d$  коэффициентов, конфигурация которых „чувствительна“ к локальным возмущениям спектров ФТ на различных масштабных уровнях. При этом физические проблемы становятся информационными [8]. Действительно, кристалл как объект исследования является сложной динамической системой, для которой одинаково важными являются как динамические (т.е. достаточно грубые), так и информационные (т.е. более тонкие) особенности ее поведения при внешнем воздействии [3,8–10]. Представление подмножеств вейвлет-коэффициентов  $C_a$  и  $C_d$  в виде параметрических вейвлет-сигнатур  $C_d = f(C_a)$  (рис. 4), которые на каждом масштабном уровне характеризуются индивидуальной конфигурацией, площадью и другими показателями, подобны параметрическим сигнатурам спектра ФТ (рис. 2).

Таким образом, впервые показана возможность осуществления „обратного перехода“ из информационного пространства вейвлет-коэффициентов в динамическое пространство фотоиндуцированных состояний. Мощность подмножеств этих состояний, операции над ними и их отношения делают возможным анализ изменений спектральных и других характеристик кристалла при обработке в рамках различных физических моделей. В частности, успешно проведена адаптация предложенной методики к температурным, диэлектрическим, координатным и другим характеристикам фотоотклика, что является предметом следующей статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.

#### Список литературы

- [1] Ю.Д. Третьяков, Н.Н. Олейников, Е.А. Гудилин, А.А. Вертегел, А.Н. Баранов. Неорг. матер., **30** (3), 29 (1994).
- [2] В.К. Комарь, В.П. Мигаль, С.В. Сулима, А.С. Фомин. ФТП, **40** (2), 133 (2006).
- [3] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Письма ЖТФ, **32** (11), 44 (2006).
- [4] V. Komar, A. Gektin, D. Nalivaiko, I. Klimenko, V. Mygal, O. Panchuk, A. Rybka. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **458** (1–2), 113 (2001).
- [5] S. Bergmann, J. Ihmels, N. Barkai. Phys. Rev. E, **67**, 031 902 (2003).
- [6] И.Н. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло. УФН, **171** (5), 465 (2001).
- [7] В.П. Мигаль. ФТП, **35** (10), 1188 (2001).
- [8] Б.Б. Кадомцев. Успехи физ. наук, **169**, 507 (1999).
- [9] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Неорг. матер., **43** (11), 1316 (2007).
- [10] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. ФТП, **40** (4), 408 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

## CdZnTe solid solution photocurrent spectra in parametric form and their discrete wavelet decomposition

A.V. But, V.P. Mygal, A.S. Phomin

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

**Abstract** It is shown, that by means of discrete wavelet-transformation it is possible to carry out conversion of the  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0.1-0.2$ ) solid solution photocurrent spectrum  $I(\lambda)$  into individual subset of the approximation  $C_a$  and detail  $C_d$  coefficients, distribution of which are high-sensible to the local indignations of the photoresponse at the different scale levels. Presentation of these subsets as the  $C_d = f(C_a)$  parametric wavelet-signatures allows to carry out transition from the informative space of the wavelet-coefficients to the dynamic space of the photoinduction states. Analysis of changes of the  $C_d = f(C_a)$  configuration and areas which they covered at every scale level at the cyclic measuring of the photocurrent spectrum allowed to expose hidden reversible and nonreversible local changes in those.