

07;12

## Структура временного фотоотклика полупроводниковых сенсоров

© А.В. Бут, В.П. Мигаль, А.С. Фомин

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»,  
61070 Харьков, Украина  
e-mail: khai\_physical\_lab@xai.edu.ua

(Поступило в Редакцию 18 августа 2011 г.)

Установлено, что преобразование временного фотоотклика  $I(t)$  кристалла в сигнатуру  $I(t) - dI/dt$  фазовой плоскости позволяет определить парциальные вклады составляющих структуры фотоотклика и степень их взаимосвязи, а также предложить интегративные показатели устойчивости  $B_{din}$  и асимметрии  $K_{\lambda,E}$  структуры фотоотклика, отображающие влияние внешних и внутренних факторов соответственно.

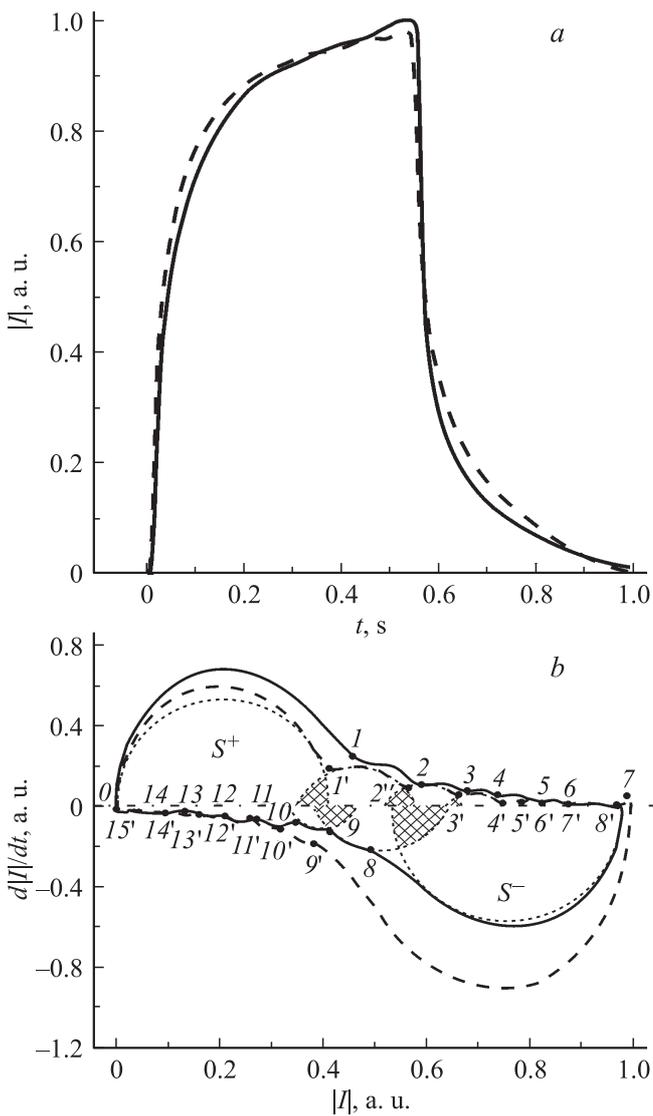
Применение полупроводниковых сенсоров на основе многокомпонентных соединений  $A^{II}B^VI$  и  $A^IVB^III C^VI$  выявило ряд взаимосвязанных эксплуатационных и диагностических проблем, среди которых ключевой остается определение их качества. Так, на некоторых сенсорах на основе кристаллов  $CdTe:Cl$ ,  $CdZnTe$  даже с высокими значениями произведения подвижности неравновесных носителей заряда  $\mu$  на время их жизни  $\tau$  ( $\mu\tau \geq 10^3 \text{ cm}^2/V$ ) в экстремальных условиях проявляются артефакты и неустойчивости временного  $I(t)$  и спектрального  $I(\lambda)$  фотооткликов (ФО) [1]. При этом их выявление и анализ в обычных условиях весьма затруднительны и зачастую неоднозначны [2]. Об этом свидетельствует невысокая эффективность отбора сенсорных кристаллов на основе произведения  $\mu\tau$ . Тем не менее преобразование спектрального фотоотклика  $I(\lambda)$  в соответствующую сигнатуру  $I(\lambda) - dI/d\lambda$  позволило установить количество составляющих спектрального ФО [3,4]. Его изменение при увеличении интенсивности фотовозбуждения или величины внешнего электрического поля свидетельствует о том, что кристаллы многокомпонентных соединений как объект исследования являются сложной динамической системой. Очевидно, изменения в структуре ФО таких кристаллов связаны с перестройкой взаимосвязей между подсистемами кристалла, для анализа которой необходимы показатели, интегративно отображающих их системные изменения при тестовом воздействии, что и было основной целью настоящей работы.

Объектом для исследований были выбраны кристаллы твердых растворов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  ( $x = 0.05-0.16$ ). Их параметры и методика эксперимента приведены в работах [3,4].

Форма кинетики фототока (ФТ)  $I(t)$  для большинства исследованных кристаллов  $CdZnTe$  при тестировании П-образными монохроматическими фотоимпульсами мало зависит от длины волны излучения  $\lambda$ , величины и направления электрического поля  $E$  (рисунки, а). Однако преобразование зависимости  $I(t)$  в сигнатуру  $I(t) - dI/dt$  фазового пространства позволило выявить индивидуальные динамические особенности структуры оцифрованного фотоотклика сенсоров (ри-

сунки, б) [5]. Как видно из рисунка, б, конфигурация сигнатуры  $I(t) - dI/dt$  кинетики ФТ представляет собой замкнутую последовательность из  $n$  дугообразных участков, которые отличаются длиной  $l$  и кривизной  $C = 1/R$ , где  $R$  — радиус кривизны соответствующего дугообразного участка. Поэтому сигнатура  $I(t) - dI/dt$  кинетики ФТ  $I(t)$  является своеобразным фотоэлектрическим циклом. В его конфигурации достаточно хорошо просматриваются составляющие ФО, а площадь цикла отображает некое множество возможных фотоиндуцированных динамических (ФИД) микросостояний. Поэтому парциальный вклад каждой составляющей ФО можно оценить посредством показателя  $P_i = l_i \cdot C_i / 2\pi$ . Как видно из рисунка, б, изменение направления смещающего поля  $E$  на противоположное сопровождается перераспределением парциальных вкладов  $P_i$  пяти-шести взаимосвязанных составляющих ФО, что свидетельствует о перестройке структуры кинетики ФТ кристаллов  $CdZnTe$ . В большинстве исследованных образцов количество и величина парциальных вкладов  $P_i$  составляющих ФО также зависит от длины волны излучения  $\lambda$  и величины электрического поля  $E$ . Поэтому с увеличением номера  $i$  дугообразного участка как при нарастании, так и при релаксации ФТ, парциальные вклады  $P_i$  соответствующих составляющих ФО и их разрешение уменьшаются (рисунки, б). Очевидно, это свидетельствует об увеличении степени взаимосвязи  $f_{rel}$  между этими составляющими ФО. Действительно, с увеличением  $i$  произведение неопределенности измерения длины  $\Delta l_i$  на неопределенность измерения кривизны  $\Delta C_i = 1/\Delta R_i$  порядка 1, т.е.  $\Delta l_i \cdot \Delta C_i = 1$ , что и ограничивает разрешающую способность определения составляющих структуры ФО сенсоров.

Поскольку площадь фотоэлектрического цикла  $I(t) - dI/dt$  в фазовом пространстве отображает мощность множества возможных ФИД-микросостояний  $W$  [4,5], то можно предположить, что натуральный логарифм от  $W$  определяет энтропию  $S_B = k \ln W$  неравновесного микросостояния кристалла как системы в данный момент времени. Тогда по изменению площади сигнатуры  $I(t) - dI/dt$  в последовательности фотоэлектрических циклов и соответствующего изменения эн-



Типичные кинетики фототока  $I(t)$  кристалла  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  (a) и их сигнатуры  $I(t) - dI/dt$  (b) при  $\lambda = 800$  nm и противоположных направлений смещающего поля  $E$ : прямом — сплошная линия, обратном — штриховая линия. Разделительными точками 0–14 и 0–15' выделены соответствующие дугообразные участки сигнатур.

тропии  $\Delta S_B$  можем определить обратимы или необратимы эти циклы, используя энтропийный критерий необратимости  $\Delta S \geq 0$ . Действительно, для одних длин волн (800 и 860 nm) изменение площади сигнатуры кинетики ФТ со временем (более  $10^3$  циклов) характеризуется необратимым увеличением мощности подмножества ФИД-микросостояний (разность площадей  $\Delta S = S_{i2} - S_{i1} > 0$ ), а для других (900 nm)  $\Delta S = 0$ . Следовательно, характер перестройки зависит от длины волны фотовозбуждения  $\lambda$  и напряженности поля  $E$ , что указывает на изменение степени взаимосвязи между составляющими ФО.

Исходя из изложенного выше, парциальному вкладу каждой динамической составляющей ФО

можно поставить в соответствие определенное подмножество возможных ФИД микросостояний кристалла. Это позволило осуществить декомпозицию структуры ФО посредством представления множества ФИД микросостояний кристалла как совокупности подмножеств  $\{W_1, \dots, W_i, W_{i+1}, \dots, W_n\} \in W$ , где  $i \in \{1 \dots n\}$ , каждое из которых отображает определенную составляющую структуры ФО-кристалла. Поскольку операции произведения, деления и т.д. подмножеств  $\{W_1, \dots, W_i, W_{i+1}, \dots, W_n\}$  являются новыми подмножествами, то отношения между ними позволяют анализировать изменения характера взаимосвязи между составляющими структуры ФО. Так, для оценки степени взаимосвязи между соседними составляющими ФО представим себе, что каждый  $i$ -й дугообразный участок сигнатуры является сегментом окружности с площадью  $S_i$ , которая отображает мощность подмножества возможных для  $i$ -го парциального вклада ФИД микросостояний кристалла. При этом площади соседних  $i$  и  $i+1$  сегментов перекрываются (пересекаются) (рисунок, b, заштрихованные области). Площадь заштрихованной области отображает мощность нового подмножества общих микросостояний  $W_i^{com}$ , которую можно определить через операцию произведения  $i$  и  $i+1$  подмножеств  $W_i^{com} = W_i \cap W_{i+1}$ . Затем посредством операции симметричной разности подмножеств  $W_i$  и  $W_{i+1}$  определим мощность подмножества индивидуальных ФИД-микросостояний  $W_i^{ind} = W_i \Delta W_{i+1}$ . Тогда операция отношения  $R$  двух новых подмножеств  $W_i^{com}$  и  $W_i^{ind}$ , т.е.  $f_i^{rel} = W_i^{com} R W_i^{ind}$ , определяет степень взаимосвязи  $f_i^{rel}$  перекрывающихся во времени соседних составляющих ФО.

Оказалось, что с увеличением номера составляющей ФО  $i$  мощность  $W_i$  уменьшается, а степень их взаимосвязи  $f_i^{rel}$  действительно увеличивается. Аналогичным образом протекает процесс релаксации ФТ. Очевидно, неравенство площадей составляющих сигнатур  $S^+$  и  $S^-$ , ограниченных контурами 0–1–...–7–0 и 0–7–...–15'–0 (рисунок, b), т.е.  $S^+ - S^- \neq 0$ , является следствием динамических особенностей генерационно-рекомбинационных процессов в фотоэлектрическом цикле. При этом системные изменения в структуре кинетики ФТ интегративно отображаются отношением площадей  $S^+/S^-$  (рисунок, b), что позволяет ввести безразмерный показатель устойчивости структуры ФО  $B_{din} = S^+/S^-$ . Его стремление к единице, по сути, указывает на обратимость данного фотоэлектрического цикла. Действительно, при фотовозбуждении из области  $\lambda = 920$  nm показатель устойчивости структуры ФО  $B_{din} \approx 1$ . Это подтверждает, что конфигурация соответствующей сигнатуры  $I(t) - dI/dt$  кинетики ФТ не зависит от направления и величины внешнего поля  $E$ , фотоактивной предыстории и практически не изменяется со временем. Поэтому кинетика ФТ стабильна, а такой фотоэлектрический цикл, следовательно, обратим. С другой стороны, при фотовозбуждении длинами волн 800 и 860 nm показатель  $B_{din} \neq 1$ . При этом вы-

явлено изменение конфигурации сигнатуры  $I(t) - dI/dt$  как со временем, так и при увеличении напряженности внешнего поля  $\mathbf{E}$ . Кроме того, установлены необратимые изменения конфигурации сигнатур  $I(t) - dI/dt$  после фотоэлектро-акустической обработки части образцов, для которых  $B_{din}$  в процессе стремится к единице. Следовательно, устойчивый цикл обратим. При этом зависимость показателя устойчивости структуры ФО  $B_{din}$  от длины волны фотовозбуждения  $\lambda$  указывает на перестройку энергетического спектра, которая была обнаружена в спектрах ФТ [3,4] и, как оказалось, связана с перезарядкой сложных центров fotocувствительности. Обнаруженную на ряде образцов асимметрию сигнатур  $I(t) - dI/dt$  кинетики ФТ, полученных при прямом ( $\downarrow$ ) и обратном ( $\uparrow$ ) направлениях поля  $\mathbf{E}$ , но при фиксированной  $\lambda$ , можно интегративно оценить с помощью показателя асимметрии ФО  $K_{\lambda,E}$ . Он равен отношению показателей  $K_{\lambda,E} = B_{din}^{\uparrow}/B_{din}^{\downarrow}$ , характеризующих динамическую устойчивость при противоположных направлениях поля  $\mathbf{E}$ . Причиной асимметрии ФО являются внутренние факторы (сильные градиенты поля, нелинейность, асимметрия центров fotocувствительности и др.). Так, нелинейный характер изменения фазовых траекторий сигнатур соответствующих ВАХ данных кристаллов [6,7] указывает на то, что одной из причин асимметрии ФО в кристаллах CdZnTe может быть индуцированная при  $E > E_{cr}$  нелинейность. Поэтому применение показателей асимметрии  $K_{\lambda,E}$  и устойчивости составляющих ФО  $B_{din}$ , которые чувствительны к внутренним и внешним факторам соответственно, позволяет установить, с одной стороны, диапазоны внешних воздействий ( $\Delta E, \Delta \lambda, \Delta f, \dots$ ), в которых происходят необратимые изменения фотоэлектрического цикла, что важно при обработке кристалла. С другой стороны — подобрать условия эксплуатации сенсора, при которых фотоэлектрический цикл обратим.

Таким образом, переход от традиционного временного  $I(t)$  представления ФО-кристалла к соответствующим сигнатурам  $I(t) - dI/dt$  фазовой плоскости позволяет выявлять структуру ФО, т.е. определять количество  $n$  и величину парциальных вкладов отдельных его составляющих  $P_i$ , а также степень их взаимосвязей  $f_i^{rel}$ . Очевидно, индивидуальные особенности кинетики  $I(t)$  ФТ обусловлены перестройкой составляющих ее структуры. С помощью интегративных показателей  $B_{din}$  и  $K_{\lambda,E}$ , чувствительных к внешним и внутренним факторам соответственно, стало возможным определять необратимость протекающих фотоэлектрических циклов. Предложенные показатели  $P_i, f_i^{rel}, B_{din}$  и  $K_{\lambda,E}$  могут способствовать решению ряда взаимосвязанных технологических, диагностических и эксплуатационных проблем сенсорных и других современных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.

## Список литературы

- [1] *Abbene L., Del Sordo S. et al. // Nucl. Sci. Symp. Conf. Record. 2007. Vol. 2. P. 1525–1530.*
- [2] *Koley G., Liu J., Mandal Krishna C. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 102 121.*
- [3] *Бут А.В., Мигаль В.П., Фомин А.С. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 9. С. 1257–1260.*
- [4] *Бут А.В., Мигаль В.П., Фомин А.С. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 5. С. 608–612.*
- [5] *Мигаль В.П., Фомин А.С. // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 11. С. 1316–1320.*
- [6] *Мигаль В.П., Фомин А.С. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 44–51.*
- [7] *Fu D.J., Lee J.C., Choi S.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002, Vol. 81. N 27. P. 5207.*