

Временная и пространственная устойчивость фотоэлектрического отклика кристаллов CdZnTe

© В.П. Мигаль[¶], А.С. Фомин^{¶¶}

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

(Получена 15 августа 2005 г. Принята к печати 14 сентября 2005 г.)

В кристаллах CdZnTe, содержащих многообразие структурных неоднородностей, выявлены спектральная, временная и пространственная неустойчивости фотоэлектрического отклика I . Показано, что их характер и взаимосвязь наиболее ярко проявляются в диаграммах $dI(t)/dt = f(I(t))$ и $dI(\nu)/d\nu = f(I(\nu))$ (ν — частота, t — время), на которых хорошо видны процессы, протекающие при срыве устойчивости.

PACS: 72.40.+w, 61.72.Nh, 61.66.Fh

Основной проблемой материалов $A^{II}B^{VI}$ и сенсоров на их основе является неустойчивость характеристик, которая главным образом обусловлена наличием в них многообразия структурных неоднородностей. Как показано в работах [1,2], перестройка полей, создаваемых в кристаллах CdZnTe двумерными дефектами структуры (двойниками, блоками мозаичности, полосами скольжения и т.п.), оказывает существенное влияние на спектр фоточувствительности, приводя в ряде случаев к неустойчивости в определенных спектральных диапазонах. Поэтому естественно предположить, что она также сопровождается временной и пространственной неустойчивостью. Проверка этого предположения и являлась основной целью данной работы.

Исследовались зависимость стационарного фототока от координаты положения монохроматического светового зонда и динамический фотоотклик на импульсное П-образное фотовозбуждение кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.1-0.2$), выращенных методом вертикальной кристаллизации из расплава при различных условиях [3]. На противоположные наибольшие грани образцов с удельным сопротивлением $\rho \sim (10^{10}-10^{11}) \text{ Ом} \cdot \text{см}$, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $5 \times 5 \times 2 \text{ мм}$ или $11 \times 11 \times 2 \text{ мм}$, наносились золотые или индий-галлиевые контакты. Частота следования монохроматических световых импульсов варьировалась в диапазоне 0.01–1 Гц. Стационарные спектры фототока $I = f(\nu)$ (ν — частота излучения) и динамический фотоотклик образцов измеряли в поле с напряженностью $E = 10-10^4 \text{ В/см}$ с помощью электрометрического преобразователя на основе операционного усилителя AD795. При этом осуществлялась оцифровка сигнала и обработка полученных данных на компьютере. Кристаллическое качество образцов исследовали методами травления, инфракрасной микроскопии и модифицированным теневым методом. Сканирование поверхности кристалла монохроматическим световым зондом шириной 50 мкм осуществляли посредством автоматического перемещения образца со скоростями от 0.5

до 10 мм/мин. Для выявления устойчивых (аттракторов) и неустойчивых циклов фотоотклика при П-образном фотовозбуждении исследовали совокупности фазовых диаграмм $dI(t)/dt = f(I(t))$ (t — время), полученных при монотонном нагреве и охлаждении образцов [4].

Как показали исследования, для анализа спектральной устойчивости кристаллов CdZnTe наиболее подходят диаграммы $dI(\nu)/d\nu = f(I(\nu))$, построенные на основе спектральных зависимостей фототока $I = f(\nu)$. Они отображают спектр фототока в параметрическом виде и содержат замкнутые последовательности дугообразных участков. При этом на диаграммах $dI(\nu)/d\nu = f(I(\nu))$, полученных при последовательном измерении спектров фототока одного и того же образца в одинаковых условиях, выявляются спектральные диапазоны неустойчивого фотоотклика, на которых наблюдается плохая воспроизводимость. Поскольку число спектрально неустойчивых участков коррелирует со степенью структурного совершенства и больше для образцов, содержащих многообразие структурных неоднородностей, представлялось интересным исследовать координатные зависимости фототока $I(x)$, где x — координата положения монохроматического зонда, на частотах, соответствующих устойчивым и неустойчивым участкам спектра. Как оказалось, они являются индивидуальными для всех исследованных образцов и зависят от частоты излучения, что свидетельствует о влиянии полей структурных неоднородностей на характер распределения электрически активных центров. При этом кривые $I(x)$, полученные на частотах, соответствующих устойчивым участкам диаграмм $dI(\nu)/d\nu = f(I(\nu))$, хорошо воспроизводятся при многократном сканировании. В то же время на зависимостях $I(x)$, соответствующих частотам из диапазонов спектральной неустойчивости таких диаграмм, можно условно выделить три участка (рис. 1, области 1, 2, 3), сохраняющихся при повышении напряженности поля E . Участки зависимости $I(x)$, соответствующие областям 1 и 2 образца, хорошо воспроизводятся при его многократном сканировании, однако с ростом E их воспроизводимость ухудшается. Вместе с тем участок зависимости $I(x)$, соответствующий области 3 кристалла,

[¶] E-mail: mygal@mail.ru

^{¶¶} E-mail: khai_physical_lab@xai.edu.ua

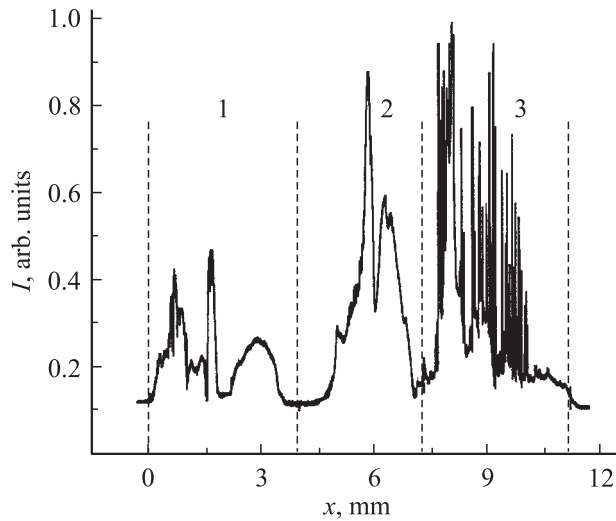


Рис. 1. Зависимость $I = f(x)$ кристалла $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$. Длина волны $\lambda = 0.85$ мкм, $T = 300$ К. $E = 4 \cdot 10^3$ В/см.

плохо воспроизводится уже при малых значениях E , а начиная с $E > 10^3$ В/см появляется пространственная неустойчивость отклика в виде хаотических флуктуаций фототока. Дальнейшее увеличение напряженности поля приводит к росту амплитуды флуктуаций и возникновению необратимых изменений. В совокупности зависимостей $I(x)$, полученных при одинаковых условиях для образцов CdZnTe, имеющих многообразие структурных неоднородностей, одни максимумы уменьшаются, другие увеличиваются, а на некоторых образцах наблюдается их инверсия, что натолкнуло на мысль о взаимосвязи пространственной и временной неустойчивостей фотоэлектрического отклика кристалла CdZnTe. Действительно, при зондовом фотовозбуждении П-образными импульсами только в области 3 кристаллов возникает временная неустойчивость фотоотклика. Наиболее ярко она проявляется на фазовых диаграммах $dI(t)/dt = f(I(t))$ в виде неустойчивых циклов, каждый из которых состоит из последовательности дугообразных участков различной кривизны. В то же время при П-образном фотовозбуждении областей 1 и 2 наблюдается высокая временная устойчивость циклов. Изменения температуры в пределах 5–10 К или прикладываемого к образцу напряжения в пределах 10–20 В не приводят к потере устойчивости, что позволяет рассматривать эти циклы как аттрактор. Устойчивые траектории, соответствующие аттракторам, являются практически плавными кривыми, и лишь их небольшая часть представляет собой последовательность едва заметных дугообразных участков, которые при повышении скорости нагрева или охлаждения сглаживаются. Это указывает на важную роль в формировании динамически устойчивого фотоотклика кристаллов CdZnTe принципа Ле Шателье.

Естественный интерес представляет процесс срыва устойчивости. Поэтому нами был исследован характер изменения фазовых диаграмм $dI(t)/dt = f(I(t))$ при

монотонном нагреве кристалла CdZnTe до температуры $T = 400$ К и интегральном фотовозбуждении всего образца (рис. 2). Как оказалось, при определенных температурах фазовые траектории быстро уходят от аттракторов, и их вид существенно изменяется. При этом на них проявляются дугообразные участки, причем, чем дальше от аттрактора они удаляются, тем больше таких участков появляется и увеличивается их кривизна. При подходе к следующему аттрактору, т.е. к области с устойчивым откликом, происходит обратный процесс — фазовые траектории снова становятся плавными. При затемнении области 3 (рис. 1) на диаграмме $dI(t)/dt = f(I(t))$ появляются уже не три, а два аттрактора и соответствующие им температурные диапазоны расширяются. Как оказалось, затемнение областей кристалла со стабильным откликом (рис. 1, области 1

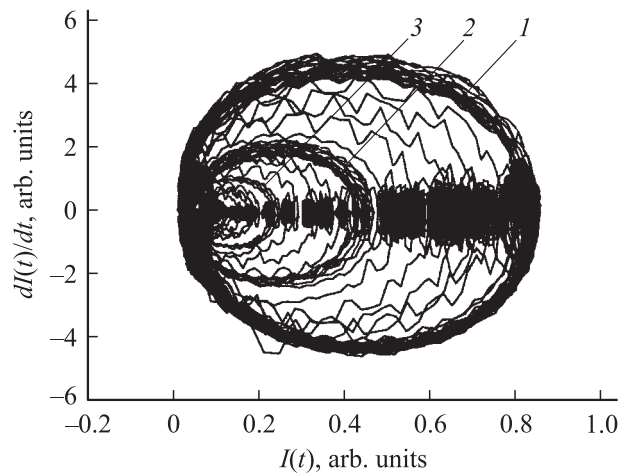


Рис. 2. Диаграмма $dI(t)/dt = f(I(t))$ кристалла $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$, полученная при интегральном по площади фотовозбуждении и монотонном нагреве от 300 до 400 К в течение 60 мин. Аттракторы: 1 — 300–310 К, 2 — 348–356 К, 3 — 384–390 К. Длина волны $\lambda = 0.85$ мкм, $E = 4 \cdot 10^3$ В/см.

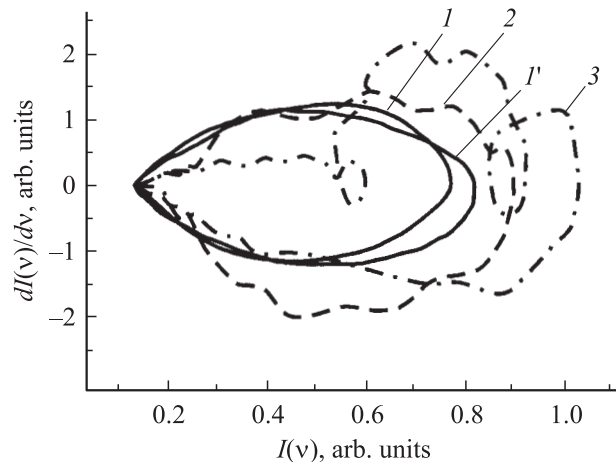


Рис. 3. Диаграммы $dI(v)/dv = f(I(v))$ для различных областей образца $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$. 1, 1' — область 1, 2 — область 2, 3 — область 3. $T = 300$ К, $E = 4 \cdot 10^3$ В/см.

и 2) практически не изменяет вида фазовых траекторий, увеличивая всего лишь степень размытия аттракторов.

Естественно предположить, что выявленные временная и пространственная неустойчивости фотоотклика связаны со спектральной неустойчивостью. Это подтверждают исследования спектральных зависимостей фототока, полученных при зондовом фотовозбуждении отдельных областей таких кристаллов и представленных в виде диаграмм $dI(v)/v = f(I(v))$ (рис. 3). Эти зависимости для областей 1, 2 и 3 на рис. 1 различаются числом дугообразных участков, охватывают различную площадь и являются индивидуальными характеристиками каждой области образца. Выявленные особенности этих диаграмм, такие как зависимость от предыстории, направления и времени сканирования спектра, а также существенная перестройка с увеличением интенсивности фотовозбуждения, позволяют рассматривать их как некий портрет, геометрическая конфигурация которого определяется изменением характера взаимодействия электронной и упругой подсистем кристалла вследствие перезарядки сложных центров и возникновения пространственно неоднородного распределения поляризованного заряда. Поэтому на основе анализа диаграмм $dI(v)/dv = f(I(v))$ для двух соседних участков, полученных в одинаковых условиях, можно определить коэффициент спектральной устойчивости $K = \Delta S / \sum S_i$, где ΔS — площадь перекрытия этих диаграмм, а $\sum S_i$ — их общая площадь. Он интегративно характеризует степень влияния полей отдельных ансамблей структурных неоднородностей на фотоотклик. Так, при комнатной температуре в областях кристалла 1 и 2 он равен 0.7–0.9 (рис. 3, кривые I и I'), а в области 3 составляет 0.4–0.6. С увеличением температуры или напряженности поля происходит срыв устойчивости фотоотклика и значение коэффициента спектральной устойчивости для всех областей кристалла не превышает 0.4. Более того, если при измерении спектров фототока в локальных точках электрически нестабильной области 3 осуществлять модуляцию прикладываемого поля прямоугольными импульсами положительной или отрицательной полярности, то в спектрах фототока четко проявляются границы диапазонов спектральной неустойчивости. Так, в зависимости от амплитуды, скважности и полярности прикладываемого импульсного напряжения лишь на определенных участках спектра появляются дополнительные четкие экстремумы, что только подтверждает связь спектральной и пространственной неустойчивостей и является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, в кристаллах CdZnTe, содержащих многообразие структурных неоднородностей, спектральная, временная и пространственная неустойчивости являются взаимосвязанными процессами. При этом характер срыва устойчивости наиболее полно проявляется в диаграммах $dI(t)/dt = f(I(t))$ и $dI(v)/dv = f(I(v))$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Украины.

Список литературы

- [1] И.А. Клименко, В.К. Комарь, В.П. Мигаль, Д.П. Наливайко. ФТП, **35**, 139 (2001).
- [2] И.А. Клименко, В.П. Мигаль. ФТП, **36**, 397 (2002).
- [3] V. Komar, A. Gektin, D. Nalivaiko, I. Klimenko, V. Mygal, O. Panchuk, A. Rybka. Nuclear Instr. Meth. Phys. Res., **458** (1–2), 113 (2001).
- [4] В.П. Мигаль, И.А. Клименко, А.С. Фомин. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* (Харьков, Изд-во „ХАИ“, 2004) вып. 23, с. 63.

Редактор Л.В. Шаронова

Temporal and spatial stability of the photoelectric response in CdZnTe crystals

V.P. Mygal, A.S. Phomin

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

Abstract The spectral, temporal and spatial photoelectric response (I) instabilities are revealed in CdZnTe crystals, containing a variety of structural inhomogeneities. It is shown, that their character and interrelation can be demonstrated in the diagrams $dI(t)/dt = f(I(t))$ and $dI(v)/dv = f(I(v))$ (t — time, v — frequency), where processes at the failure of stability are well visible.