

Асимметрия фотоотклика кристаллов CdZnTe

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

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

(Получена 8 июня 2010 г. Принята к печати 22 июня 2010 г.)

Показано, что преобразование фотоэлектрических характеристик сенсоров на основе кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05-0.15$) в параметрические спектральные, $I(\lambda)-dI/d\lambda$, кинетические, $I(t)-dI/dt$, и динамические, $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$, сигнатуры ($I(\lambda)$ — фототок, U — напряжение, f — частота, t — время, y — координата) позволяет выявить интегративные особенности фотоотклика, обусловленные его асимметрией и нелинейностью. Предложены показатели асимметрии и сбалансированности динамических и энергетических фотоиндуцированных состояний, которые системно отображают влияние многомасштабных полей на фотоэлектронные процессы. С их помощью определены диапазоны внешних воздействий, при которых системные особенности фотоотклика сенсоров минимальны или максимальны, что позволяет повысить эффективность целенаправленного подбора и обработки сенсоров.

1. Введение

Сильно неравновесные условия получения кристаллов CdZnTe приводят к многообразию процессов, незавершенность которых порождает дефекты структуры различных типов и разного масштаба [1]. Эти условия также способствуют самоорганизации дефектов и образованию кластеров, пространственно неоднородное распределение которых формирует многомасштабные упругие и электрические поля. Они предопределяют интегративные особенности фотоотклика (ФО) сенсоров, а именно спектральные, временные и другие нестабильности и артефакты, которые свидетельствуют о перестройке внутренних полей. При этом изменяется структура ФО вследствие изменения взаимосвязей между подсистемами кристаллов, что отчетливо проявляется в конфигурациях пакетов сигнатур фотоэлектрических характеристик в фазовом пространстве [2] и на вейвлет-спектрограммах характеристик [3]. Установлено, что согласование пространственных масштабов внешнего электрического поля с внутренним делает асимметричной и менее стабильной конфигурацию сигнатур $I(\lambda)-dI/d\lambda$ спектральных зависимостей фототока (ФТ) $I(\lambda)$ кристаллов CdZnTe, а также достаточно хорошо выделяет парциальные вклады центров фоточувствительности различной природы [4]. Поскольку в конфигурациях сигнатур других фотоэлектрических характеристик кристаллов также проявляется асимметрия [5], то, очевидно, в ней скрыта качественно новая информация об интегративных особенностях фотоэлектронных процессов. Поэтому основной целью данной работы являлись системные исследования асимметрии ФО кристаллов CdZnTe.

2. Образцы и методы исследования

Исследовались кристаллы твердых растворов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05-0.15$) спектрометрического

и детекторного качества, выращенные из расплава модифицированным методом Бриджмена вертикальной кристаллизации и содержащие дефекты и кластеры различных типов и разного масштаба [1]. Удельное сопротивление исследуемых образцов, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $6 \times 6 \times 3$ или $11 \times 11 \times 12$ мм, находилось в пределах $\rho \approx 10^{10}-5 \cdot 10^{11}$ Ом·см. Исследования ростовых дефектов, проведенные рентгеновскими, оптическими и диэлектрическими методами [1], выявили их многообразие и наличие флуктуаций состава. На противоположные наибольшие грани образцов, наносились золотые контакты. Измерения спектров ФТ $I(\lambda)$ кристаллов проводили в диапазоне длин волн $\lambda = 700-1000$ нм в автоматическом режиме с помощью электрометрического преобразователя на основе операционного усилителя AD820 (Analog Devices). Напряженность внешнего постоянного или переменного полей устанавливалась в пределах $E = 10-5 \cdot 10^2$ В/см. 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. Динамические сигнатуры $U-I(\Delta y)_{f,\lambda}$ вольт-амперных характеристик (ВАХ) [2] измеряли при пилообразном напряжении U заданной частоты f , при длине волны фотовозбуждения λ с помощью анализатора сигнатур, основанного на ИМС C8051F121 (Signal). При расчете длины l_i , кривизны C_i дугообразных участков и площади S , охватываемой сигнатурой $I(\lambda)-dI/d\lambda$ в фазовом пространстве, использовался цифровой метод определения параметров плоских кривых и фигур, реализованный в пакете MatLab.

3. Результаты и обсуждение

Спектр фототока (ФТ) $I(\lambda)$ наиболее структурно-совершенных образцов спектрометрического качества хорошо воспроизводится при повторных измерениях. При этом изменение направления внешнего смещающе-

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

го поля \mathbf{E} на противоположное, как правило, сопровождается появлением локальных спектральных особенностей, которые малозаметны в спектре фототока $I(\lambda)$ (рис. 1, *a*), однако достаточно хорошо проявляются в конфигурации параметрической сигнатуры $I(\lambda) - dI/d\lambda$ спектра ФТ (рис. 1, *b*). Ее анализ включает:

— декомпозицию конфигурации сигнатуры на i дугообразных участков ($1-2, 2-3, 3-4$ и т.д.);

— определение длины l_i , кривизны $C_i = 1/R_i$ (R_i — радиус кривизны) дугообразных участков, с помощью которых оценивали парциальные вклады $P_i = l_i C_i / 2\pi$ центров фоточувствительности различной природы;

— определение площади S , охватываемой сигнатурой $I(\lambda) - dI/d\lambda$, которая отображает мощность множества возможных фотоиндуцированных энергетических состояний W [2,4].

Сравнение парциальных вкладов P_i , отображаемых участками $1-2$ и $1-2'$, а также $2-3$ и $2'-3'$, показывает, что при изменении направления поля на противоположное происходит перераспределение вкладов, при котором произведение отношений $(P_{1-2}/P_{1-2'}) \times (P_{2-3}/P_{2'-3'}) = 1$. Поэтому такое перераспределение вкладов естественно связать с перезарядкой соответствующих центров фоточувствительности.

Сопоставление конфигураций сигнатур (рис. 1, *b*) спектров ФТ, полученных при противоположных направлениях поля \mathbf{E} (прямом и обратном), указывает на различие количества и величин парциальных вкладов P_i , а также мощностей множеств фотоиндуцированных энергетических состояний W_{fr} и W_{rv} . Это свидетельствует о системном характере наблюдаемой перестройки спектральной структуры ФО данных кристаллов, для интегративной оценки которой воспользуемся операциями над множествами и их графической интерпретацией с помощью диаграмм Эйлера–Венна. Так, произведение этих множеств является их пересечением $W_{fr} \cap W_{rv}$ и отображает подмножество общих фотоиндуцированных энергетических состояний W_{com} (рис. 1, *b* — незаполненная точками область). Оно определяет ту часть фотоиндуцированных состояний, которая не зависит от направления поля \mathbf{E} . С помощью операции симметрической разности Δ подмножеств W_{fr} и W_{rv} выделим два индивидуальных подмножества W_{ind1} и W_{ind2} , которые охватывают замкнутые контуры $1-2-3-2'-1$ и $4'-5-4-4'$ (рис. 1, *b* — заполненные точками области). Тогда на основе постулата целостности [6] кристалла как системы введем интегративный показатель спектральной асимметрии сигнатур ФО кристаллов, который можно определить через операцию R отношения двух подмножеств $K_{as} = (W_{fr} \Delta W_{rv}) R (W_{fr} \cap W_{rv})$. С учетом графической интерпретации операций над подмножествами, K_{as} является отношением суммы площадей, которые отображают индивидуальные фотоиндуцированные энергетические состояния ΣS_{ind} , к площади S_{com} , отвечающей за общие фотоиндуцированные энергетические состояния, т.е. $K_{as} = \Sigma S_{ind} / S_{com}$. Для большинства образцов спектрометрического качества $K_{as} < 0.1$ и постоянен, тогда как для образцов детекторного качества $K_{as} > 0.1$ и зависит от фотоактивной предьистории.

Площади S_{sw} и S_{lw} , которые охватывают соответствующие замкнутые контуры $1-2-3-4-5-6-1$ и $1-6-7-1$ сигнатуры $I(\lambda) - dI/d\lambda$ в коротковолновой и длинноволновой областях спектра ФТ, соответственно отображают мощности подмножеств фотоиндуцированных энергетических состояний W_{sw} и W_{lw} . Поэтому их отношение $S_{sw}/S_{lw} \equiv W_{sw}/W_{lw}$ является системным показателем сбалансированности мощностей фотоиндуцированных энергетических состояний B_{en} . Поскольку для образцов спектрометрического качества показатель B_{en}

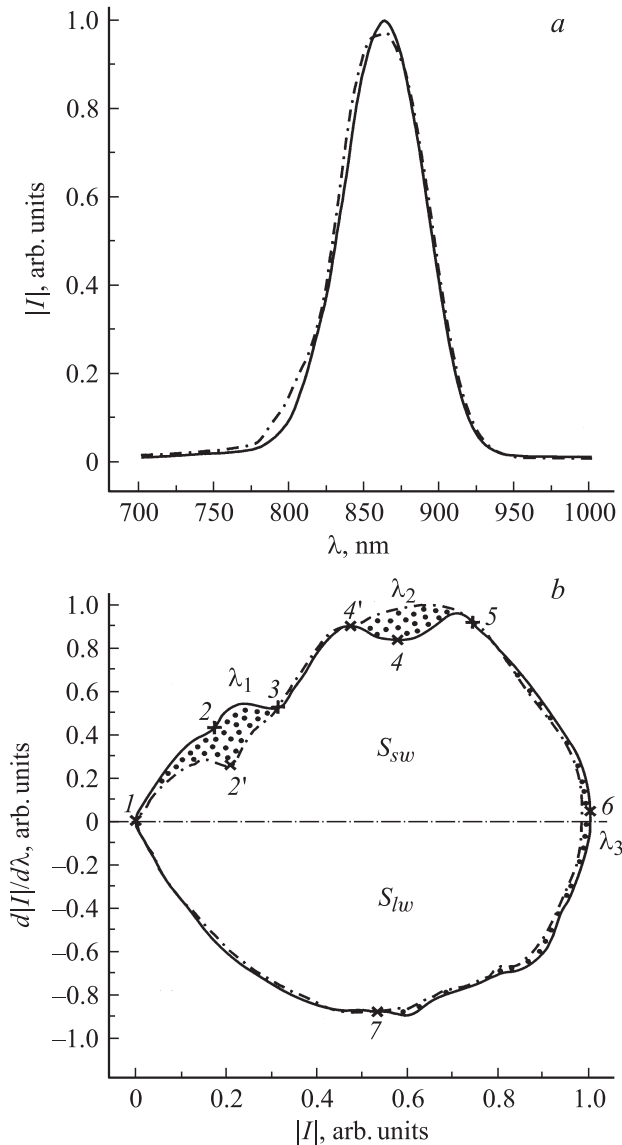


Рис. 1. Спектральные зависимости фототока $I(\lambda)$ (*a*) и их параметрические сигнатуры $I(\lambda) - dI/d\lambda$ (*b*), полученные при противоположных направлениях смещающего поля \mathbf{E} : прямое — сплошная линия, выделяет подмножество W_{fr} ; обратное — штрихпунктирная линия, выделяет подмножество W_{rv} . Точками выделены подмножества индивидуальных энергетических состояний W_{ind} .

Показатели B_{din} и K_{din} при различных направлениях поля \mathbf{E} и разных длинах волн фотовозбуждения λ

Направление поля \mathbf{E}	Длина волны λ , нм	$B_{\text{din}} = S^+/S^-$	$B_{\text{din } fr}/B_{\text{din } rv}$	$K_{\text{din}} = S_{\text{ind}}/S_{\text{com}}$
Прямое	810	1.64	0.83	0.32
Обратное		1.96		
Прямое	835	0.82	0.92	0.15
Обратное		0.89		
Прямое	885	0.99	1.0	0.001
Обратное		0.99		

близок к 1, то, очевидно, для стабильности спектральных характеристик необходима сбалансированность энергетических состояний. Наибольшие изменения ФО выявлены в спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, выделенных участками 1–3, 4'–5 в местах пересечения двух сигнатур $I(\lambda)-dI/d\lambda$ спектров ФТ. Как видно из рис. 1, *b*, на последовательности участков 1–2–3–4–5–6 сигнатуры $I(\lambda)-dI/d\lambda$, которая отображает коротковолновую область спектра, при изменении направления поля \mathbf{E} на противоположное наблюдается перераспределение мощностей индивидуальных фотоиндуцированных энергетических состояний подмножеств $W_{\text{ind}1}$ и $W_{\text{ind}2}$ из одной спектральной области, $\Delta\lambda_1$, в другую, $\Delta\lambda_2$. Их отношение системно отображает перестройку ФО и определяется отношением площадей, охватываемых замкнутыми контурами 1–2–3–2'–1 и 4'–5–4–4', которое составило ~ 1.1 . Уменьшение мощности одного подмножества индивидуальных фотоиндуцированных энергетических состояний, $W_{\text{ind}1}$, при изменении направления внешнего поля \mathbf{E} на противоположное и увеличение мощности другого подмножества, $W_{\text{ind}2}$, естественно связать с перезарядкой сложных центров фоточувствительности. Как и следовало ожидать, такая перезарядка сопровождается перестройкой кинетики ФО сенсора, которая наиболее полно проявляется в различии конфигураций сигнатур $I(t)-dI/dt$ кинетики ФТ [5,7], полученных при воздействии П-образными фотоимпульсами из диапазонов длин волн $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ (рис. 2, *a, b*). При этом длительность и период следования фотоимпульсов согласовывались с временными масштабами измерения спектров ФТ. В результате установлено, что конфигурация сигнатур $I(t)-dI/dt$ кинетики ФТ зависит от направления смещающего поля \mathbf{E} и длины волны фотовозбуждения λ , а характер ее изменений свидетельствует о протекании трех–четырех взаимосвязанных процессов — одном быстрым и двух–трех медленных.

Неравенство площадей, $S^+ \neq S^-$, противоположных частей сигнатур $I(t)-dI/dt$ кинетики ФТ относительно нулевого уровня ($dI/dt = 0$), интегративно отображает различие мощностей фотоиндуцированных динамических состояний при увеличении (W^+) и релаксации (W^-) ФТ. На основе постулата дополненности [6] введем системный показатель сбалансированности дина-

ческих состояний B_{din} через операцию отношения R двух подмножеств $W^+ \cap W^-$. Следовательно $B_{\text{bin}} = S^+/S^-$ и интегративно отображает влияние направления внеш-

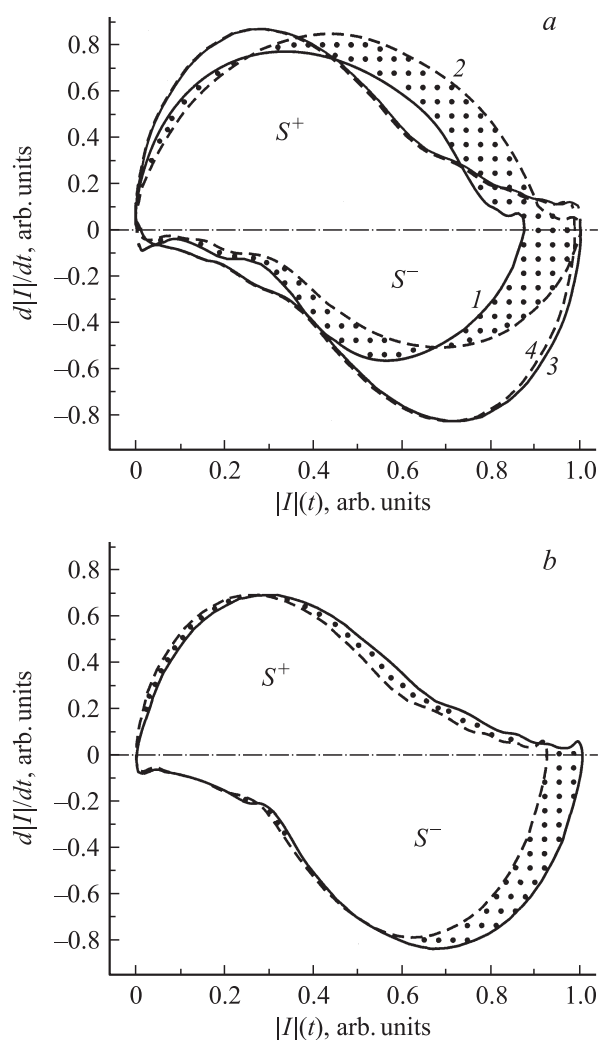


Рис. 2. Сигнатуры $I(t)-dI/dt$ кинетики ФТ при фотовозбуждении из максимумов спектральных диапазонов $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_3$, $\Delta\lambda_2$ соответственно: *a* — 810 (*1, 2*) и 885 нм (*3, 4*); *b* — 835 нм. Сплошная линия — прямое смещающее поле, штриховая — обратное. Точками выделены подмножества индивидуальных динамических состояний W_{ind} . Длительность фотоимпульсов 1 с.

него поля \mathbf{E} на процессы возбуждения и релаксации неравновесных носителей заряда. В зависимости от длины волны фотовозбуждения B_{din} может быть больше, меньше или равен единице (см. таблицу). Для длин волн с показателем сбалансированности динамических состояний $B_{\text{din}} \approx 1$ сигнатура кинетики ФТ не зависит от фотоактивной предыстории и практически не изменяется со временем. Из таблицы видим, что отношения показателей сбалансированности $B_{\text{din } fr}/B_{\text{din } rv}$ для противоположных направлений поля \mathbf{E} при фотовозбуждении из $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ не равны, что может быть связано с изменением внутреннего поля при перезарядке центров.

С другой стороны, сигнатуры кинетики ФТ $I(t) - dI/dt$ для противоположных направлений поля \mathbf{E} имеют как общую площадь S_{com} , так и индивидуальную S_{ind} . Их отношение $S_{\text{ind}}/S_{\text{com}}$ позволяет оценить долю индивидуальных подмножеств фотоиндуцированных динамических состояний в ФО и ввести показатель динамической асимметрии K_{din} . Анализ таблицы показывает, что перестройка спектра ФТ при изменении направления поля \mathbf{E} лишь частично связана с перезарядкой сложных центров фоточувствительности. Сопоставление показателей динамической асимметрии K_{din} для $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, которые для данного сенсора равны 0.32 и 0.15 соответственно, показывает, что приблизительно половина мощности подмножеств индивидуальных фотоиндуцированных динамических состояний связана с перезарядкой центров фоточувствительности.

Появление спектральной и динамической асимметрии свидетельствует о доминирующем влиянии на ФО перестройки многомасштабных полей, сформированных электрически активными дефектами различного типа и разного масштаба. Действительно, суперпозиция внешнего и внутреннего полей может как стимулировать, так и подавлять процессы переноса, рекомбинации и накопления неравновесных носителей заряда, особенности взаимосвязей которых интегративно отображаются в конфигурациях сигнатур ФО, а также в системных показателях асимметрии K_{as} и K_{din} , сбалансированности мощностей динамических, B_{din} , и энергетических, B_{en} , фотоиндуцированных состояний.

Многообразие асимметричных конфигураций сигнатур ФО кристаллов в фазовом пространстве, их чувствительность к малым изменениям напряженности внешнего поля и его направления, а также зависимость от фотоактивной предыстории указывают на нелинейность ФО. Действительно, исследования световых динамических сигнатур $U - I(\Delta y)_{f,\lambda}$ ВАХ показали, что их конфигурация при определенной напряженности поля становится нелинейной (рис. 3), а также существенно зависит от длины волны фотовозбуждения, частоты и напряженности внешнего поля.

Как видно из рис. 3, изменение величины внешнего пилообразного напряжения U на частоте $f = 1$ Гц сопровождается трансформацией конфигурации сигнатуры и появлением асимметрии $K_{\text{as}} = S^+/S^-$, которая, в свою

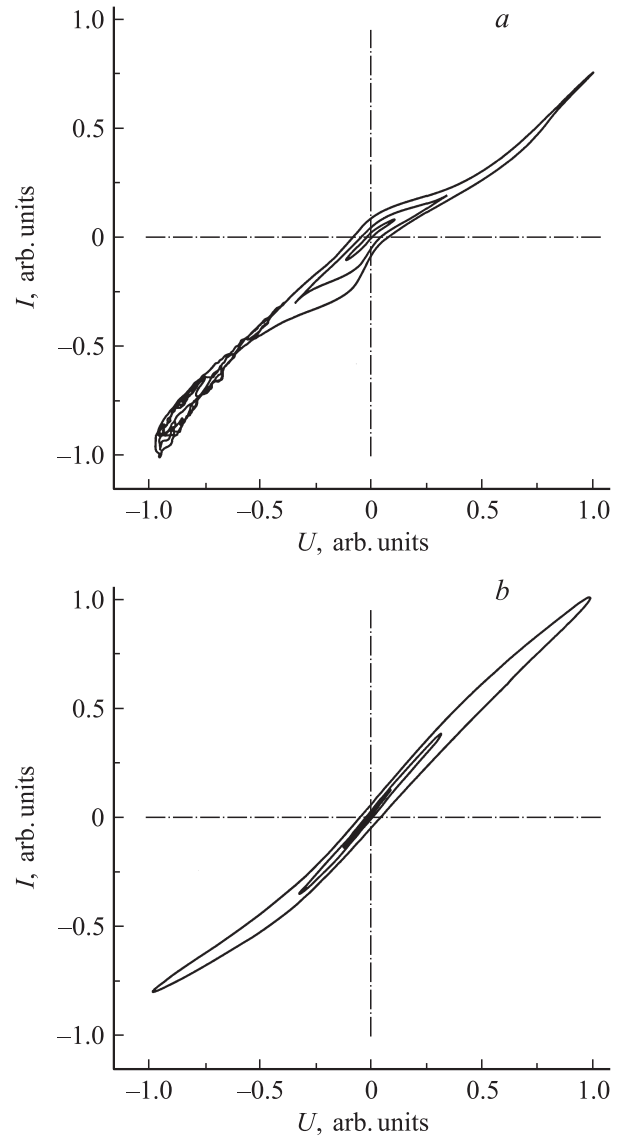


Рис. 3. Динамические сигнатуры $U - I(\Delta y)_{f,\lambda}$ ВАХ при фотовозбуждении из максимумов спектральных областей $\Delta\lambda_1$ (а, 810 нм), $\Delta\lambda_2$ (б, 835 нм) при внешнем пилообразном напряжении $U = 7, 20, 60$ В на частоте $f = 1$ Гц.

очередь, связана с нелинейностью ФО. При этом нелинейность сигнатур динамических ВАХ более характерна для образцов детекторного качества. На некоторых из них выявлена локальная неустойчивость спектральных характеристик, а также спектральные и другие артефакты. Очевидно, асимметричный характер сигнатур ФО данных кристаллов является следствием перестройки многомасштабных полей, сопровождаемой при определенных условиях флуктуациями фототока [4,7,8]. На это указывает размытие пакета сигнатур динамических ВАХ только в одном квадранте при определенных внешних условиях. Путем анализа зависимости K_{as} от внешних факторов определены диапазоны $\Delta\lambda$, Δf , U_{cr} [2] внеш-

них воздействий, в которых выявлен неустойчивый во времени и зависящий от предыстории ФО. В целом появление индивидуальных подмножеств W_{ind} фотоиндуцированных энергетических и динамических состояний указывает на эволюцию полей, которая сопровождается асимметрией и несбалансированностью составляющих ФО кристаллов.

4. Заключение

Таким образом, в конфигурациях параметрических спектральных, $I(\lambda) - dI/d\lambda$, кинетических, $I(t) - dI/dt$, и динамических, $U - I(\Delta y)_{f,\lambda}$, сигнатур ФО системно отображается характер изменений взаимосвязей между подсистемами кристалла при внешнем воздействии. Применение системных показателей асимметрии, K_{as} , K_{din} , и сбалансированности динамических и энергетических состояний, B_{din} и B_{en} , позволяет выявлять и исследовать интегративные особенности ФО сенсоров, которые не проявляются при традиционной обработке результатов измерений. В частности, с их помощью установлены диапазоны $\Delta\lambda$, Δf , U_{cr} внешних воздействий, в которых системные особенности ФО сенсоров минимальны или максимальны. Кроме того, применение предложенных системных показателей позволяет повысить эффективность целенаправленного подбора сенсоров и условий для их электроакустической обработки с целью повышения стабильности сенсорных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.

Список литературы

- [1] V. Komar, A. Gektin, D. Nalivaiko, I. Klimenko, V. Mygal, O. Panchuk, A. Rybka. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **458** (1–2), 113 (2001).
- [2] А.В. Бут, В.П. Мигаль, А.С. Фомин. ФТП, **43** (9), 1257 (2009).
- [3] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Письма ЖТФ, **32** (11), 44 (2006).
- [4] А.В. Бут, В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Письма ЖТФ, **35** (17), 72 (2009).
- [5] В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Неорг. матер., **43** (11), 1316 (2007).
- [6] Дж. Клир. *Систематология. Автоматизация решения системных задач* (М., Радио и связь, 1990) [Пер. с англ., G.J. Klir. *Architecture of Systems Problem Solving*, with D. Elias (N.Y., Plenum Press, 1985)].
- [7] А.В. Бут, В.П. Мигаль, А.С. Фомин. Functional Mater., **16** (1), 5 (2009).
- [8] А.В. Бут, В.П. Мигаль, А.С. Фомин. ФТП, **43** (5), 608 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoresponse asymmetry of CdZnTe crystals

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

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

Abstract It is shown, that transformation of the photoelectric characteristics of the sensor base on $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05 - 0.15$) crystals to parametric spectral $I(\lambda) - dI/d\lambda$, kinetic $I(t) - dI/dt$ and dynamic $U - I(\Delta y)_{f,\lambda}$ signatures allows to expose the integrative features of photoresponse conditioned by its asymmetry and nonlinearity. The indexes of asymmetry and equilibrium of the dynamic and energy photoinduced states which represents the influence of multiscale fields on the photoelectron processes are offered. With its help the ranges of exposure are defined at which the system features of the sensor photoresponse are minimal or maximal that allows to increase the efficiency of purposeful selection and treatment of sensors.