

УДК 621.383.52

В.П. МИГАЛЬ, И.А. КЛИМЕНКО, Г.В. МИГАЛЬ, А.С. ФОМИН, А.В. БУТ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И ВЕЙВЛЕТ СИГНАТУР
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СЕНСОРОВ**

Установлено, что для сенсоров, обладающих сложным нелинейным динамическим поведением, одинаково важны как динамические, так и информационные составляющие отклика на внешнее воздействие. В рамках информационно-динамического подхода показана эффективность совместного применения сигнатурного и вейвлет-анализа в диагностике сенсоров физических и биофизических величин. Для анализа сигнатур спектральных, частотных и других характеристик предложены универсальные характеристические признаки и интегративные показатели. Применение непрерывного и дискретного вейвлет-анализа характеристик сенсора позволило перевести диагностические проблемы в информационные и выявить особенности отклика на разных масштабных уровнях. Для решения актуальных проблем диагностики, исследования и эксплуатации сенсоров разработан алгоритм трансформации подмножеств виртуальных вейвлет-коэффициентов в вейвлет-сигнатуры динамического пространства. Это позволяет перейти к индивидуальным подмножествам индуцированных состояний сенсора, конфигурация которых отображает его функциональное состояние и весьма «чувствительна» к локальным возмущениям сигнала на различных масштабных уровнях, тем самым осуществлен обратный переход из информационного в динамическое пространство.

Ключевые слова: сенсоры, фотоотклик, диагностика, сигнатурный анализ, вейвлет-анализ.

Введение

Сенсоры физических и биофизических величин широко используют в аэрокосмической технике, атомной энергетике, медицине и в др. областях. Однако, как существенно неравновесные условия создания и эксплуатации сенсоров, так и многообразие взаимосвязей между их подсистемами приводит к естественной пространственно-неоднородной самоорганизации электронных процессов [1]. Как правило, большинству сенсоров присущи проблемы локальной неустойчивости характеристик, нестабильности и непрогнозируемости параметров, нелинейности отклика, памяти и др. Следствием этого является ряд взаимосвязанных проблем исследования, изготовления и эксплуатации сенсоров, которые проявляются, как правило, при определенном сочетании внешних и внутренних факторов или в экстремальных условиях.

В обычных условиях исследования индивидуальные особенности взаимосвязей между подсистемами сенсоров проявляются в тонких, порой незаметных, изменениях различных параметров и характеристик сенсоров [2 – 6]. При этом их выявление весьма затруднительно, а анализ полученных результатов не однозначен. Кроме того, различные артефакты, а также необратимые изменения параметров и характеристик сенсоров при эксплуатации обуславливают необходимость мониторинга их ра-

ботоспособности и периодической калибровки. С другой стороны, подобные проблемы были характерны для материалов и электронных приборов, которые эксплуатируются в экстремальных условиях. В основу их решения был положен аналоговый сигнатурный анализ путем сравнения ВАХ с их эталоном.

В работах [5 – 12] показано, что индивидуальность фотоотклика (ФО) сенсорных материалов и их поведение в экстремальных условиях наиболее полно отображают сигнатуры диэлектрического отклика – диаграммы $\varepsilon^*(\lambda)$ (рис. 1, а), $\varepsilon^*(E)$ и др. Действительно, площадь сигнатуры диэлектрического отклика отображает в фазовой плоскости мощность подмножества V_n индуцированных состояний, а ее конфигурация определяется характером их взаимосвязей. Ее изменение при внешнем воздействии, а также операции над подмножествами этих состояний являются новыми подмножествами.

Поэтому сигнатуры характеристик системно отображают функциональное состояние сенсора, для анализа которого предложены интегративные параметры W_1 , W_2 и др., которые определяются через операцию R отношения между двумя подмножествами V_n индуцированных состояний [6].

$$W_1 = (V_1 \cup V_2) R (V_1 \cap V_2);$$

$$W_2 = (V_1 \setminus V_2) R (V_1 \cap V_2);$$

$$W_3 = (V_1 \cup V_2) R (V_1 \Delta V_2).$$

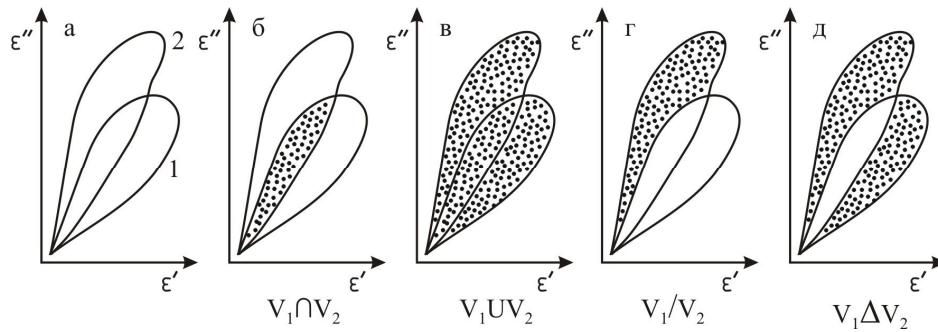


Рис. 1. Сигнатуры $\varepsilon^*(\lambda)$ фотодиэлектрического отклика сенсоров (а) без подсветки (кривая 1) и при подсветке (кривая 2); б – д – операции над подмножествами индуцированных состояний

Это позволило увеличить информационную базу данных и выявить характер изменений взаимосвязей в сенсоре (заготовке, кристалле, оптическом элементе и т.д.) при силовой нагрузке или при обработке. Параметры W_1 , W_2 и др. положены также в основу идентификации и классификации сенсоров, кристаллов и функциональных элементов.

Однако любой сенсор является системным объектом, в нелинейном отклике которого одинаково важны как динамические, так и информационные аспекты поведения. Поэтому возможность решения актуальных проблем диагностики, исследования и эксплуатации сенсоров мы видим в дальнейшем развитии информационно-динамического подхода и сигнатурного анализа с широким применением информационных технологий в рамках синергетической парадигмы, что и являлось основной целью данной работы.

Объект и методы исследования

Исследовались сенсоры на основе кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0,1 \dots 0,2$), а также другие сенсоры, детекторы и спектрометры гамма излучения, биосенсоры, которыми являются некоторые биологически активные точки кожи человека.

Все исследования были автоматизированы и компьютеризированы. Измерения спектральных, частотных, пространственных зависимостей фотоотклика сенсоров производили в автоматическом режиме с помощью электрометрического преобразователя на основе операционного усилителя AD795 (Analog Devices). Напряженность внешнего постоянного или переменного полей устанавливалась в пределах $10 \dots 5 \cdot 10^2$ В/см. Оцифровка сигнала производилась с частотой выборки $f_d = 10^3 \dots 10^5$ Гц посредством промышленной системы сбора данных ADVANTECH PCI-1711L с дальнейшей обработкой на персональном компьютере.

На дисплее наблюдались фазовые траектории, являющиеся локальными фотоэлектрическими сигнатурами $U - I(y)_{f,\lambda}$, полученные с помощью анализатора сигнатур при автоматическом сканировании образца с различной скоростью. Контроль однородности материала осуществлялся заданием определенной ширины светового зонда Δs , частоты тестирующего поля f и температуры.

Для выявления локальной неустойчивости и индивидуальных особенностей характеристик проводились циклические измерения в одинаковых условиях.

Результаты исследования

1. Сигнатуры ВАХ и пакеты сигнатур сенсоров

В ходе комплексных исследований были предложены два взаимодополняющих подхода к исследованию сенсоров – динамический [14] и информационный [15]. В основе динамического подхода лежит аналоговый сигнатурный анализ ВАХ сенсоров, т.е. сравнение их с эталоном, с также преобразование сенсорных характеристик в сигнатуры динамического (фазового) пространства [16 – 18].

Типовые сигнатуры биосенсоров кожи и сенсоров γ -излучения приведены на рис. 2.

Сравнение их с эталонными показывает, что функциональное состояние сенсоров излучения и биосенсоров кожи человека имеет вид сигнатур исправного или неисправного диода, емкости с потерями, нелинейной емкости и т.д. Поэтому сигнатурный анализ позволяет осуществлять экспресс-диагностику функционального состояния и отбор подобных сенсоров, их идентификацию и классификацию.

Для выявления влияния внешних факторов (температуры, интенсивности фотовозбуждения и др.) на работоспособность сенсоров предложены пакеты локальных фотоэлектрических сигнатур

$U - I(y)_{f,\lambda}$. Они позволили выявить локальную неустойчивость характеристик, асимметрию характеристик, границы устойчивых состояний (рис. 3).

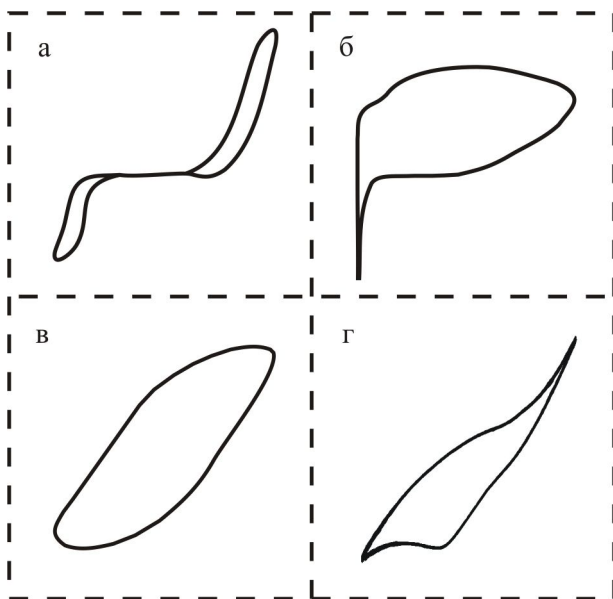


Рис. 2. Сигнатуры ВАХ сенсоров излучения и биосенсоров

Оказалось, что пакеты локальных сигнатур наиболее подходят для контроля однородности материалов и определения функционально пригодных участков кристаллического слитка. Они наглядно отображают возможные функциональные состояния сенсора (рис. 3).

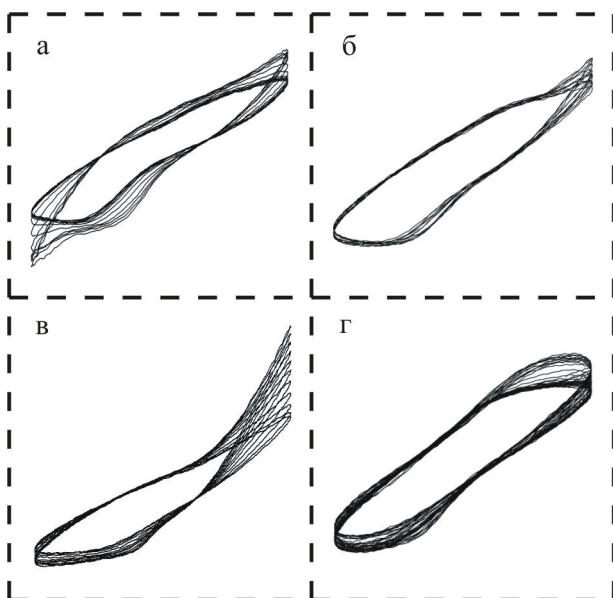


Рис. 3. Пакеты локальных фотоэлектрических сигнатур $U - I(y)_{f,\lambda}$ детекторов (а, в) и спектрометров (б, г) γ -излучения

Так, по характеру их изменения с координатой образца, а также с частотой, стало возможным выделить работоспособные срезы и участки кристалла, пригодные, например, к изготовлению сенсоров детекторного (рис. 3, а, в) или же спектрометрического качества (рис. 3, б, г). Кроме того, на основе анализа пакетов локальных сигнатур $U - I(y)_{f,\lambda}$ разработана методика отбора функционально подобных сенсоров, а также определения оптимальных режимов и условий их эксплуатации.

Отметим, что по плотности траекторий в пакете сигнатур стало возможным оценить колмогоровскую энтропию, а по их локальному размытию определить критическую напряженность воздействующего поля.

2. Фазовые сигнатуры

Для выявления динамических аспектов поведения сенсора нами предложены дифференциальные сигнатуры [11], основанные на численном дифференцировании характеристик и их представлении в параметрическом виде, т.е. сигнатур на фазовой плоскости.

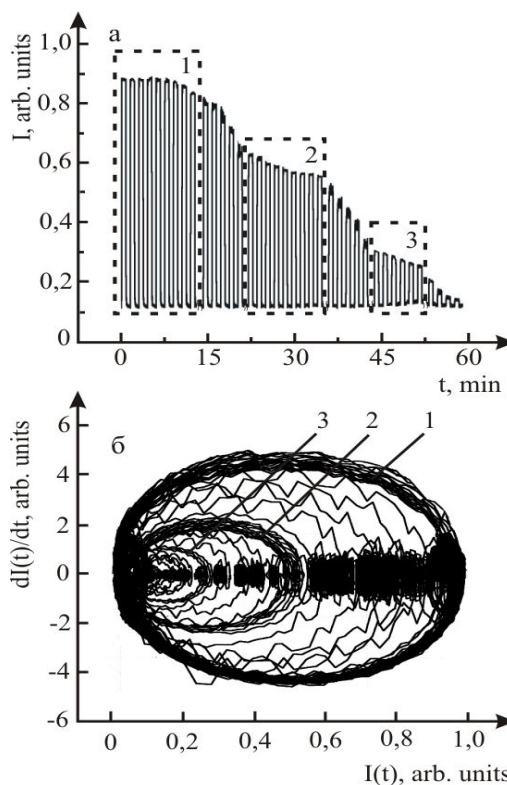


Рис. 4. Кинетика фототока $I(t)$ при интегральном по площади фотовозбуждении сенсора (а) и сигнатура $I(t) - dI/dt$ (б), построенная на ее основе. Аттракторы: 1 – 298...310 К; 2 – 348...356 К; 3 – 384...390 К

Действительно, сигнатуры $I(t) - dI/dt$, (рис. 4, б) построенные на основе зависимости кинетики фотоотклика кристаллов от температуры (рис. 4, а), не только позволяют выделить последовательность состояний, приводящих к неустойчивости фотоотклика, но и отображают более тонкие индивидуальные особенности трансформации их информационной структуры.

Установлено, что устойчивым состояниям фотоотклика на диаграммах $I(t) - dI/dt$ соответствуют совокупности предельных циклов, которые являются аттракторами. Процесс перехода фотоотклика из устойчивых состояний в неустойчивые имеет ярко выраженный ступенчатый характер и сопровождается изменением формы сигнатур $I(t) - dI/dt$, при котором плавные фазовые траектории трансформируются в последовательность подобных, но разно-масштабных дугообразных участков.

Это, а также тот факт, что все выявленные особенности фотоотклика проявляются только при периодическом импульсном фотовозбуждении, указывают на возникновение в кристалле самоорганизации электронных процессов [1]. При этом, характер динамики самоорганизации интегративно проявляется в изменении формы сигнатур отклика и их площади, а наиболее тонкие ее особенности – в перестройке информационной структуры.

Таким образом, анализ динамики и информационного содержания фотоотклика позволяет на качественном уровне выявить особенности самоорганизации электронных процессов, а также исследовать характер переключения сенсоров из устойчивого в неустойчивое состояние и определить особенности конкуренции быстрых и медленных составляющих фотоотклика.

3. Параметрические сигнатуры спектров фотоотклика

Преобразование спектров фототока (ФТ) (рис. 5, а) в параметрические сигнатуры (рис. 5, б) предложено в работе [18]. Как видно из рисунка, они представляют собой последовательность дугообразных и петлеобразных участков, которые охватывают определенную площадь, отображающую мощность подмножества индуцированных состояний. Поэтому параметрические сигнатуры достаточно четко отображают индивидуальные вклады центров фоточувствительности в спектр фототока кристаллов, которые связаны с дефектообразованием при росте, технологической обработкой или фоточувствительной предысторией.

По сути, изменение конфигурации параметрических сигнатур $I(\lambda) - dI/d\lambda$ при циклическом ска-

нировании спектра интегративно отображает перестройку энергетического спектра и взаимосвязей фотоиндуцированных состояний. За счет информационного наполнения исследуемых характеристик их сигнатуры содержат индивидуальные особенности и элементы подобия.

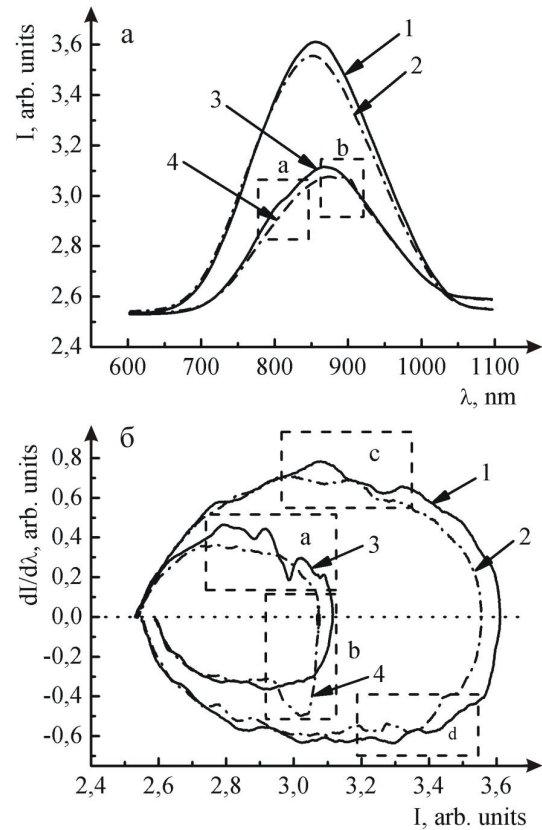


Рис. 5. Спектры фототока $I(\lambda)$ (а) и их параметрические сигнатуры $I(\lambda) - dI/d\lambda$ (б) детекторов и спектрометров для 1-го и 10-го сканирования, кривые 1, 2 и 3, 4 соответственно

Поэтому для выявления индивидуальных особенностей сигнатур $I(\lambda) - dI/d\lambda$ предложены новые характеристические признаки, показатели и параметры [6, 24]:

- площадь сигнатуры S как мощность подмножеств V фотоиндуцированных состояний;
- количество дугообразных участков n как количество составляющих фотоотклика;
- их кривизна C_n и длина участков l_n как показатель внутрисистемных взаимодействий;
- симметрия формы сигнатуры как степень сбалансированности взаимосвязей;
- степень размытия фазовых траекторий – их плотность в пакете как энтропия;
- точки начала расхождения фазовых траекторий как критический внешний параметр – метки идентификаторов;

- интегративные показатели W_1 , W_2 и др. как операции отношения мощностей подмножеств;
- безразмерный показатель парциальных вкладов $g_n = C_n \cdot S / I_n$;
- конфигурация в целом как степень согласованности динамических процессов.

Все эти характеристические признаки универсальны, так как могут быть использованы не только для сигнатур характеристик сенсоров, но и для других функциональных материалов, а также электрокардиограмм человека [19]. Они в большей степени отображают динамические, информационные и энтропийные особенности сигнала [20].

Дополнение к известным параметрам новых диагностических признаков позволяет выйти на модели более высокого уровня и системно анализировать характеристики сквозь призму индивидуальных динамических и информационных особенностей.

4. Вейвлет-анализ характеристик как переход в информационное пространство

В работах [21 – 22] показано, что посредством непрерывного вейвлет-анализа возможно осуществить преобразование спектральных и других сенсорных характеристик в индивидуальные подмножества вейвлет коэффициентов, распределение которых в частотно-временной области весьма чувствительно к локальным возмущениям фотоотклика на разных масштабных уровнях. По существу в основе информационного подхода лежит непрерывный и дискретный вейвлет-анализ, которые позволяют осуществить спектральный анализ локальных возмущений любой характеристики сенсора. В частности непрерывный вейвлет-анализ ФО позволил выявить в сенсорах многомасштабность спектра фотоотклика и локальную спектральную неустойчивость (рис. 6).

Наибольший интерес представляет детальный анализ процесса возникновения и развития неустойчивости фотоотклика с помощью вейвлет-преобразования. Вейвлет-спектрограммы для кинетики ФО, соответствующей аттрактору и неустойчивым состояниям для одного из исследованных сенсоров, полученные с помощью вейвлета Хаара, представлены на рис. 7.

На рис. 7 отчетливо видно множество локализованных спектральных составляющих, амплитуда которых, и, соответственно, яркость, убывает по мере уменьшения частоты. Число таких составляющих для вейвлет-спектрограммы неустойчивой кинетики фототока в 1,5 раза меньше, что связано с ограниченностью временных рамок процесса срыва устойчивости отклика (рис. 7, б). С увеличением мас-

штабных коэффициентов происходит плавное масштабирование вейвлета, что дало возможность проанализировать изменения информационной структуры частотно-временного образа сигнала с высоким спектральным разрешением.

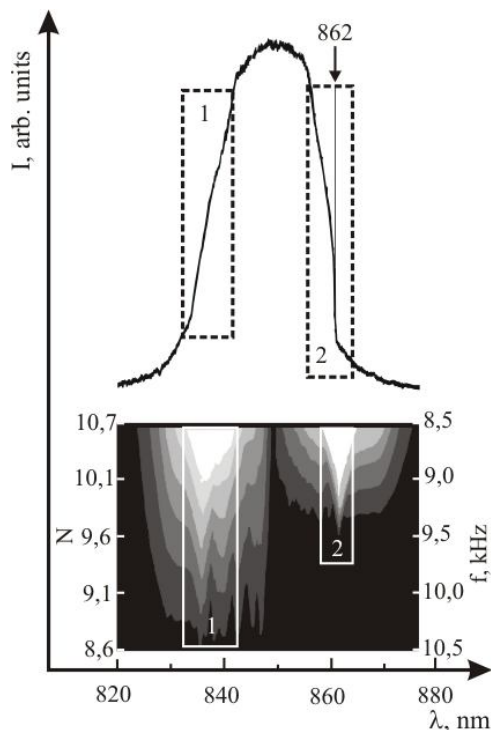


Рис. 6. Спектр фотоотклика сенсора излучения и его вейвлет-спектрограмма

При этом было выявлено уменьшение мощности определенных подмножеств вейвлет-коэффициентов на одних частотах и ее увеличение на других.

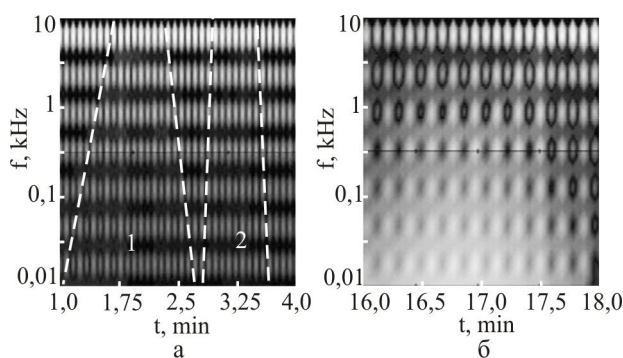


Рис. 7. Вейвлет-спектрограммы кинетики фототока $I(t)$ кристалла $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$: а – устойчивое состояние; б – неустойчивое состояние фотоотклика

Так, в области частот от 10 до 750 Гц и временных интервалах 1...2 и 3...3,5 минут (рис. 7, а, области 1 и 2) наблюдается уменьшение амплитуды отдельных спектральных составляющих отклика

кристалла, сопровождаемое одновременным ее увеличением в соседних частотных диапазонах.

Такую перестройку структуры частотно-временного образа можно рассматривать как начало формирования неустойчивых состояний, то есть возникновение зародышей неустойчивости. Предельные циклы на диаграмме $I(t) - dI/dt$ при этом представляют собой последовательность дугообразных участков, плавно переходящих друг в друга, которые охватывают подмножество фотоиндуцированных состояний. Поэтому фотоотклик при таких условиях в целом стабилен, а влияние зародышей неустойчивости на него несущественно. Об этом также свидетельствуют дискретный характер распределения энергии сигнала и ее локализация в основном на высоких частотах (рис. 8, а).

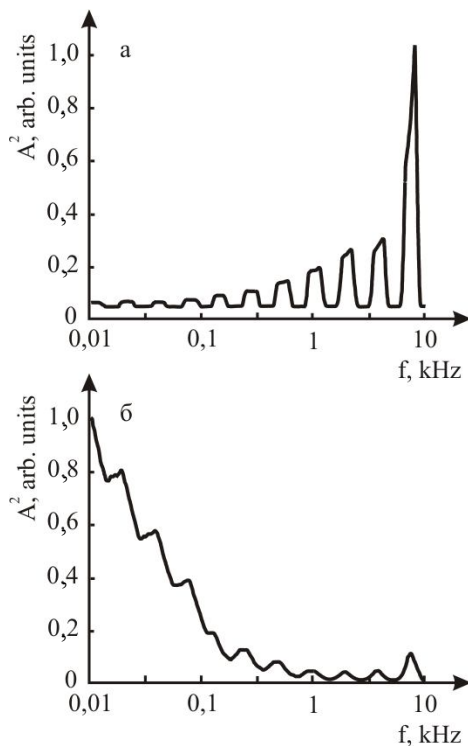


Рис. 8. Распределение энергии сигнала фотоотклика по частотам: а – устойчивое состояние; б – неустойчивое состояние фотоотклика

Как видно из (рис.8, б), срыв устойчивости фотоотклика сопровождается не только разрушением аттракторов, но и трансформацией распределения энергии сигнала с дискретного на непрерывное, которая к тому же перераспределяется в сторону низких частот.

Действительно, наибольшую амплитуду теперь имеют низкочастотные составляющие в интервале 10...500 Гц, на что указывают наибольшие значения вейвлет-коэффициентов (рис. 8, б). При этом характер изменения вида циклов на диаграммах

$I(t) - dI/dt$ свидетельствует о нелинейном характере отклика кристалла.

Таким образом, установлены закономерности формирования и разрушения аттрактора, а также природа и характер эволюции неустойчивостей.

Для большинства исследованных сенсоров излучения неустойчивые состояния пространственного фотоотклика носят скрытый характер. Предположение о том, что процессы зарождения и развития состояний неустойчивости в равной степени проявляют себя, как в характере кинетики $I(t)$, так и в характере пространственного фотоотклика $I(x)$, подтверждает сопоставительный анализ результатов вейвлет-преобразования зависимостей $I(t)$ и $I(x)$, полученных в одинаковых условиях. Характерной особенностью устойчивого пространственного отклика кристаллов (рис. 9) является разбиение вейвлет-спектрограмм на последовательность перекрывающихся подмножеств коэффициентов (и, соответственно, частот), каждое из которых имеет четкие пространственные координаты.

Особый интерес представляли те подмножества коэффициентов (рис. 9, области 1 и 2), площади которых в информационном пространстве вейвлет-коэффициентов увеличивались наиболее быстро даже при росте температуры на 3...5 К или напряженности поля на 5...10 В/см.

Очевидно, перекрытие подмножеств коэффициентов на вейвлет-спектрограммах зависимостей $I(t)$ и $I(x)$ являются причиной подобия характера развития неустойчивости пространственного и временного фотооткликов. Действительно, дальнейший рост температуры или напряженности поля приводили к еще большему увеличению площадей, которые охватывают подмножества вейвлет-коэффициентов.

Когда они практически полностью слились друг с другом – пространственный фотоотклик становился неустойчивым. Выявленная перестройка вейвлет-спектрограмм наблюдается в диапазонах 0,4...0,7 кГц (рис. 9, область 1) и 0,3...0,9 кГц (рис. 9, область 2), которые соответствуют частотам зарождения неустойчивости кинетики фототока $I(t)$.

Отметим, что возможность выявлять координаты областей, которые функционально являются зародышами неустойчивости, имеет несомненное практическое значение. Это, с одной стороны, позволяет эффективно осуществлять подбор срезов кристаллического слитка для изготовления детекторов и спектрометров уже на ранних технологических этапах, а с другой – указывает на высокие потенциальные возможности способа селективной

электроакустической обработки [23], основанного на локальном «залечивании» источников неустойчивости кристаллов. Однако существует проблема виртуальности некоторых подмножеств вейвлет-коэффициентов и анализа их на разных масштабных уровнях в рамках физических моделей.

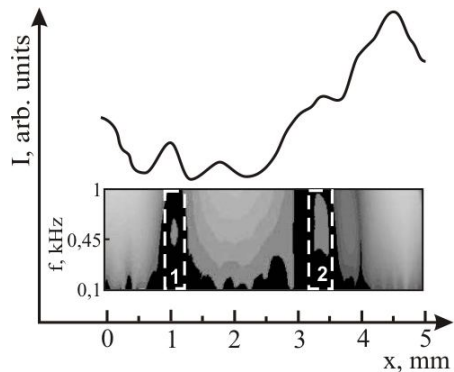


Рис. 9. Зависимость $I = f(x)$ сенсора $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ и ее вейвлет-спектрограмма

Для её решения нами применялось дискретное вейвлет-преобразование сигнала по базису вейвлета Хаара. В результате, 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) [20]. При этом каждый масштабный уровень вейвлет-разложения сигнала соответственно характеризуется индивидуальными подмножествами коэффициентов аппроксимации C_a и детализации C_d . Поэтому, применение дискретного вейвлет-преобразования спектров ФТ сенсоров γ -излучения 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.

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.10).

На зависимостях C_a и C_d от длины волны λ на четырех уровнях вейвлет-разложения спектров ФТ в областях а и б (рис.10) хорошо видно как локальные возмущения трансформируются при увеличении уровня разложения. Это позволяет выявлять и каче-

ственно анализировать изменения составляющих отклика на каждом масштабном уровне.

Таким образом, был осуществлен перевод характеристик сенсора в информационное пространство вейвлет-коэффициентов, тем самым появилась возможность использования большого потенциала информационных технологий. Однако интерпретация полученных результатов в рамках существующих физических моделей затруднительна, а в большинстве случаев и вовсе не возможна. Поэтому для использования физических моделей высокого уровня необходим обратный переход из информационного в динамическое пространство.

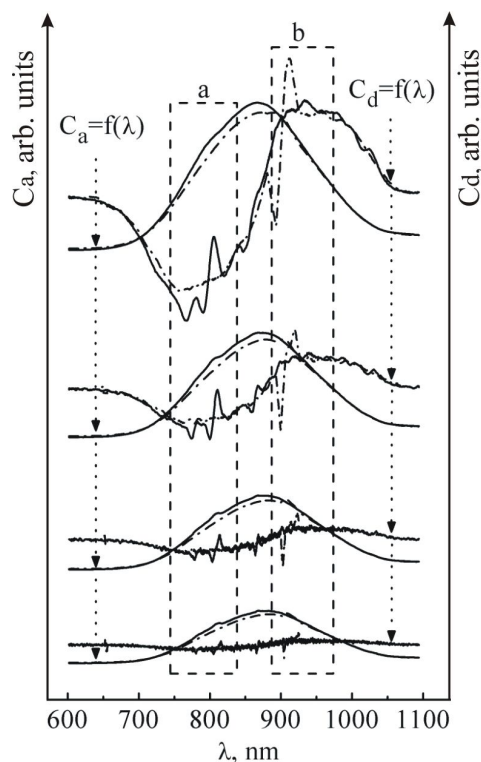


Рис. 10. Спектральные зависимости коэффициентов C_a и C_d на первых четырех уровнях вейвлет-разложения; номер уровня увеличивается снизу-вверх

5. Вейвлет-сигнатуры как способ перехода в динамическое пространство

В работе [24] предложен алгоритм осуществления «обратного перехода» из информационного пространства вейвлет-коэффициентов в динамическое пространство фотоиндуцированных состояний. Мощность подмножеств индуцированных состояний, охватываемая сигнатурой, операции над ними и их отношения делают возможным анализ изменений спектральных и других характеристик кристалла при обработке в рамках различных физических моделей.

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. 11).

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 разложения с сигнатурами $I(\lambda) - dI/d\lambda$ (рис. 5, а) позволяет рассматривать их как вейвлет-сигнатуры спектров ФТ.

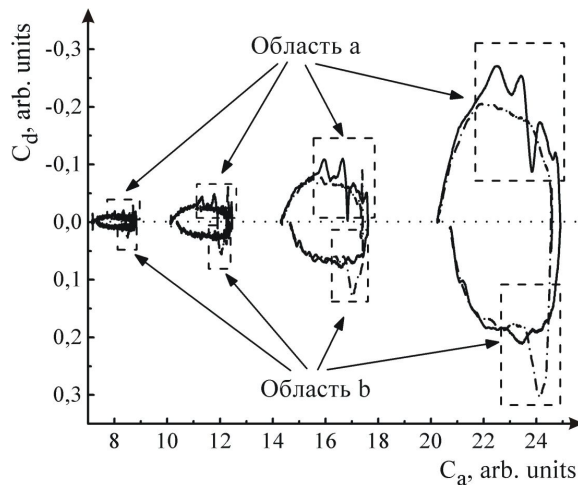


Рис. 11. Вейвлет-сигнатуры $C_d = f(C_a)$ спектров фототока на первых четырех уровнях разложения по базису вейвлета Хаара. Номер уровня увеличивается слева-направо

Их конфигурация не изменяется при циклических измерениях, а охватываемая площадь восстанавливается на всех уровнях разложения после пребывания сенсоров излучения в темноте, т.е. изменения характеристик на всех масштабных уровнях обратимы.

Выводы

Сенсоры различной природы как объект исследования являются сложной динамической системой, для которой одинаково важными являются как динамические (достаточно грубые), так и информационные (т.е. более тонкие) особенности ее поведения при внешнем воздействии [2, 8 – 10, 25]. Применение сигнатур ВАХ и параметрических сигнатур отклика дают качественно новую диагностическую информацию. Они позволяют ввести новые характеристические признаки, показатели и параметры, позволяющие осуществлять системный анализ отклика сенсоров.

С другой стороны спектральный анализ локальных возмущений сигналов сенсоров с помощью непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования характеристик сенсоров и биосенсоров позволяет перевести диагностические проблемы в информационные и рассмотреть особенности отклика сенсора на разных масштабных уровнях. Последующая трансформация виртуальных вейвлет-коэффициентов в вейвлет-сигнатуры позволяет перейти к индивидуальным подмножествам индуцированных динамических состояний сенсора, конфигурация которых отображает его функциональное состояние и весьма «чувствительна» к локальным возмущениям сигнала на различных масштабных уровнях [24]. Вейвлет-сигнатуры на каждом масштабном уровне характеризуются индивидуальной конфигурацией, площадью и другими показателями, подобны параметрическим сигнатурам спектра соответствующих характеристик сенсоров. Поэтому мощность подмножеств этих состояний, операции над ними и их отношения делают возможным анализ изменений спектральных и других характеристик сенсоров при обработке в рамках различных физических моделей. В частности, успешно проведена адаптация предложенной методики к температурным, диэлектрическим, координатным и другим характеристикам, а также к ЭКГ человека [19].

Таким образом, впервые с помощью параметрических вейвлет сигнатур показана возможность осуществления «обратного перехода» из информационного пространства вейвлет-коэффициентов в динамическое пространство фотоиндуцированных состояний.

Литература

1. Усыченко В.Г. Самоорганизация электронов в электронных приборах / В.Г. Усыченко // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, № 11. – С. 38-46.
2. Косяченко Л.А. Исследование собирания носителей в CdZnTe-детекторах рентгеновского и γ -излучения фотоэлектрическим методом / Л.А. Косяченко, Е.Л. Масляничук, И.М. Раренко // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 1018-1023.
3. Клименко И.А. Влияние упругих полей ростовых дефектов на фотодиэлектрический отклик кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ / И.А. Клименко, В.К. Комарь, В.П. Мигаль // ФТП. – 2001. – Т. 35, №2. – С. 139-142.
4. Klímenko I.A. Effect of two-dimensional structure defects on dielectric properties of CZT crystals / I.A. Klímenko, V.K. Komar, V.P. Migal, D.P. Nalivaiko // Functional Materials. – 2000. – Vol. 7, № 1. – P. 52-55.
5. Klímenko I.A. The photodielectric response of ZnSe crystals in a quadrupolar variable electric field / I.A. Klímenko, V.P. Migal // Functional Materials. – 2000. – Vol. 7, № 3. – P. 398-401.

6. Klimenko I.A. Treatment influence on the dielectric response of CdTe crystals / I.A. Klimenko, V.P. Migal // *Functional Materials*. – 2001. – Vol. 8, № 2. – P. 152-153.
7. Komar V. Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method / V. Komar, A. Gektin, D. Nalivaiko, I. Klimenko, V. Migal, O. Panchuk, A. Rybka // *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research*. – 2001. – V. 458, № 1-2. – P. 113-122.
8. Комарь В.К. Диэлектрические свойства кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ выращенных из расплава / В.К. Комарь, В.П. Мигаль, Д.П. Наливайко, О.Н. Чугай // *Неорг. Материалы*. – 2001. – Т. 37, № 5. – С. 540-543.
9. Мигаль В.П. Неаддитивная фотопроводимость и индуцированные состояния кристаллов селенида цинка / В.П. Мигаль // *ФТП*. – 2001. – Т. 35, № 10. – С. 1188-1191.
10. Клименко И.А. Обобщенный характер диэлектрического отклика кристаллов CdTe, выращенных из расплава / И.А. Клименко, В.П. Мигаль // *Физика и техника полупроводников*. – 2002. – Т. 36, № 4. – С. 397-400.
11. Gerasimenko A.S. Dielectric inhomogeneities in CdZnTe crystals / A.S. Gerasimenko, V.K. Komar, V.P. Mygal, S.V. Sulima, A.S. Phomin // *Functional Materials*. – 2006. – Vol. 13, № 1. – P. 74-76.
12. Komar V.K. Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodiode spectroscopy / V.K. Komar, V.P. Migal, O.N. Chugai // *Applied Phys. Letters*. – 2002. – Vol. 81, № 2.
13. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация / Б.Б. Кадомцев. – М.: Физматлит, 2004. – 306 с.
14. Мигаль В.П. Динамические состояния полупроводниковых сенсоров / В.П. Мигаль, И.А. Клименко, А.С. Фомин // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – X, 2004. – Вып. 23. – С. 63-66.
15. Бут А.В. Информационное сопровождение материалов, которые используются в экстремальных условиях / А.В. Бут, В.П. Мигаль, И.А. Клименко, А.С. Фомин // *Материалы и покрытия в экстремальных условиях: IV МНПК (22-26 сентября 2008 г.)*. – Жуковка, Автономная республика Крым, 2008. – С. 180.
16. Mygal V.P. The Temporal and Spatial Instability of Photoelectric Response of the CdZnTe Crystals / V.P. Mygal, A.S. Phomin // *Semiconductors*. – 2006. – Vol. 40, № 4. – P. 403-405.
17. Mygal V.P. Effect of Structural Inhomogeneities on the Dynamic Stability of the Photoelectric Response of $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ Crystals / V.P. Mygal, A.S. Phomin // *Inorganic Materials*. – 2007. – Vol. 43, № 11. – P. 1179-1183.
18. Komar V.K. Stability of the Photoresponse of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ Crystals / V.K. Komar, V.P. Mygal, S.V. Sulima, A.S. Phomin // *Semiconductors*. – 2006. – Vol. 40, № 2. – P. 128-130.
19. Пат. №77203 Україна МПК 92006, А61 В5/0402. Спосіб оцінювання електрокардіографічних даних для діагностичних цілей / Мигаль В.П., Мигаль Г.В. Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»; Заявл. 17.10.2005; Опубл. 15.11.2006; Бюл. №11 – 5 с.
20. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // *Успехи физических наук*. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.
21. Mygal V.P. The Multiscale Spectral and Spatial Character of Photoresponse in CdZnTe Crystals / V.P. Mygal, A.S. Phomin // *Technical Physic Letters*. – 2006. – Vol. 32, № 11. – P. 484-486.
22. But A.V. Evolution of the time and spatial photoresponse instabilities of the sensors based on CdZnTe crystals / A.V. But, V.P. Mygal, A.S. Phomin // *Functional Materials*. – 2009. – Vol. 16, № 1. – P. 5-10.
23. Пат. 62757А Україна, МКІ 7Н01L21/00, Н01L21/263. Спосіб акустичної обробки н'єзоелектричних кристалічних матеріалів / Мигаль В.П., Клименко І.А., Фомін О.С., Сулима С.В., Чугай О.М. Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ» – №2003054443; Заявл. 19.05.2003. Опубл. 15.12.2003, Бюл. №12. – 3 с.
24. But A.V. CdZnTe Solid Solution Photocurrent Spectra in Parametric Form and their Discrete Wavelet Decomposition / A.V. But, V.P. Mygal, A.S. Phomin // *Semiconductors*. – 2009. – Vol. 43, № 5. – P. 608-612.
25. Коломиец Б.Т. Динамические ВАХ тела человека / Б.Т. Коломиец // *Письма в ЖТФ*. – 1979. – Т. 5, № 19. – С. 44-51.

Поступила в редакцию 12.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, зав. каф. 503 В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА ВЕЙВЛЕТ-СИГНАТУР ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СЕНСОРІВ

В.П. Мигаль, І.А. Клименко, Г.В. Мигаль, О.С. Фомін, А.В. Бут

Встановлено, що для сенсорів, що характеризуються складною нелінійною динамічною поведінкою, однаково важливі як динамічні, так і інформаційні складові відклику на зовнішню дію. В рамках інформаційно-динамічного підходу показано ефективність сумісного застосування сигнатурного і вейвлет-аналізу в діагностиці сенсорів фізичних і біофізичних величин. Для аналізу сигнатур спектральних, частотних та ін-

ших характеристик запропоновано універсальні характеристичні ознаки і інтегративні показники. Застосування неперервного та дискретного вейвлет-аналізу характеристик сенсора дозволило перетворити діагностичні проблеми в інформаційні та виявити особливості відклику на різних масштабних рівнях. Для вирішення актуальних проблем діагностики, дослідження та експлуатації сенсорів розроблено алгоритм трансформації підмножин віртуальних вейвлет-коефіцієнтів у вейвлет-сигнатури динамічного простору. Це дозволяє перейти до індивідуальних підмножин індукованих станів сенсора, конфігурація яких відображає його функціональний стан і досить «чутлива» до локальних збурень сигналу на різних масштабних рівнях, тим самим був здійснений зворотній перехід з інформаційного в динамічний простір.

Ключові слова: сенсори, фотовідклик, діагностика, сигнатурний аналіз, вейвлет-аналіз.

APPLICATION OF PARAMETRIC AND WAVELET-SIGNATURES FOR THE SENSORS DIAGNOSTICS

V.P. Mygal, I.A. Klimenko, G.V. Mygal, A.S. Phomin, A.V. But

It is established, that for sensors, which have the difficult nonlinear dynamic behavior, both dynamic and informative components of response on external influence are identically important. Within the framework of the informative-dynamic approach the efficiency of the signature and wavelet-analysis partnering to the physical and biophysical quantities sensors diagnostics is shown. The universal characteristic signs and integrative indexes for the analysis of the spectral, frequency and other characteristics signatures are offered. Applied of the continuous and discrete wavelet-analysis of the sensor characteristics allows to transfer diagnostic problems into informative and exposes the features of the response at different scale level. For the actual issues decision of the sensors diagnostics, research and exploitation the algorithm of the virtual wavelet-coefficients transformation into wavelet-signatures of the dynamic space was developed. It allows passing to individual subsets of the sensor induced states, configuration of which displays its functional state and is highly «sensible» to the local indignations of signal at different scale level, in that way the reverse transition from informative into dynamic space was carried out.

Key words: sensors, photoresponse, diagnostics, signature analysis, wavelet-analysis.

Мигаль Валерій Павлович – д-р техн. наук, професор каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: mygal@mail.ru.

Клименко Игорь Андреевич – канд. техн. наук, доцент каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: Igor-Klimenko@yandex.ru.

Мигаль Галина Валерьевна – канд. техн. наук, доцент каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: mygal@mail.ru.

Фомин Александр Сергеевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: phomin@mail.ru.

Бут Андрей Владимирович – аспирант каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: khai_physical_lab@xai.edu.ua.