

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СЕНСОРА ДАВЛЕНИЯ

Н.Ю. Макарова, К.В. Татмышевский, Д.Д. Павлов  
(Владимирский государственный университет)

Рассматривается процесс механолюминесцентного преобразования сенсора давления, заключающегося в возбуждении излучения под действием механического нагружения. Математическая модель преобразования представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений. Приводятся результаты математического моделирования излучения механолюминесцентного сенсора при различных механических воздействиях<sup>1</sup>.

Ключевые слова: имитационное моделирование, математическая модель, механолюминесценция, датчик давления, механическое воздействие, оптический сигнал.

### Введение

Успешное применение сенсоров невозможно без разработки физической и математической моделей, проведения имитационного математического моделирования и проверки адекватности моделей путем экспериментальных исследований макетных образцов сенсоров и датчиков на их основе. Действие механолюминесцентного сенсорного элемента основано на преобразовании механической энергии ударного нагружения в оптический сигнал [1]. Разработка функции преобразования датчика давления с механолюминесцентным чувствительным элементом невозможна без глубокого физического анализа процесса и построения соответствующей ему математической модели. Математическая модель прямо-

го преобразования датчика необходима для разработки обратного преобразования, которое используется для выделения входного сигнала из выходного. Это вычисление производится в системе обработки информационного сигнала механолюминесцентного сенсора.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса механолюминесцентного преобразования в соответствии с физическими закономерностями люминесценции и упругопластического деформирования кристаллического тела, а также исследование закономерностей свечения механолюминесцентных сенсорных элементов в зависимости от различных входных механических воздействий.

### Математическая модель

#### механолюминесцентного чувствительного элемента Характеристика явления

Люминесценция как физическое явление обусловлена способностью светящихся веществ (люминофоров) трансформировать тот или иной вид энергии в видимый свет или реде в ультрафиолетовое или инфракрасное излучение. Способностью к механолюминесценции обладают различные материалы, имеющие в основном кристаллическую структуру. Треть всех твердых тел обладает способностью к механолюминесценции, хотя в большинстве случаев излучение очень слабо и может наблюдаться адаптированным глазом лишь в полной темноте.

Одной из групп КФ являются цинк-сульфидные соединения, обладающие наибольшей яркостью свечения. Именно по этой причине на ZnS-фосфорах проводится подавляющее большинство исследований МЛ. Для придания чистому сульфиду цинка люминесцентных свойств в него вводятся различные примеси (активаторы), определяющие спектр излучения, время послесвечения и способность к люминесценции. Акт излучения происходит в субмикроскопических образованиях, связанных с атомами активатора и называемых центрами свечения (ЦС).

#### Уравнение кинетики свечения

#### механолюминесцентного чувствительного элемента

Математическая модель МЛЧЭ представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений, основой которой является уравнение светового потока люминесценции  $\Phi(t)$  как функции времени:

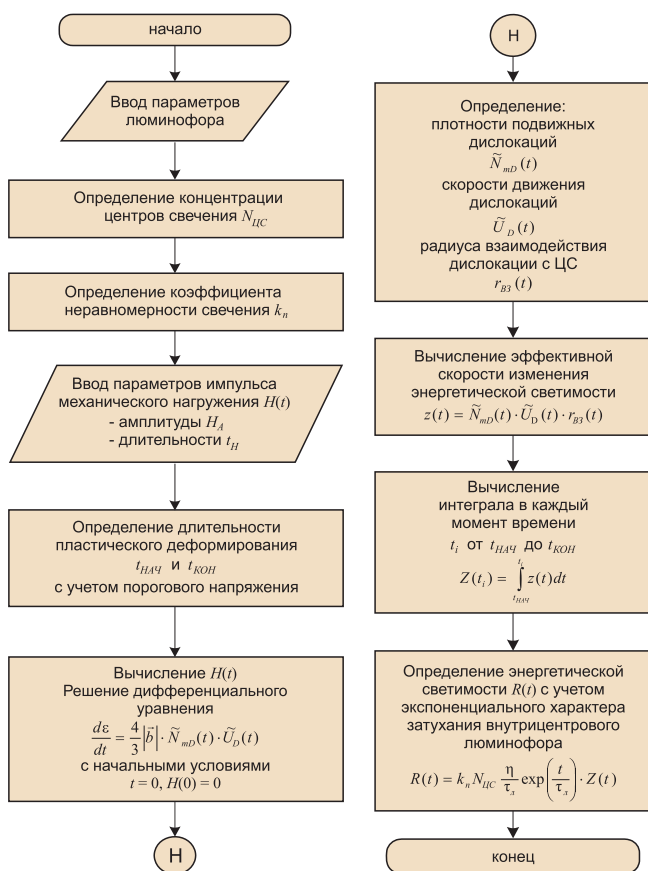


Рис. 1. Алгоритм вычисления светового потока при механическом нагружении люминофора с внутрицентральной люминесценцией

<sup>1</sup> Данная работа выполнена при проведении НИР по Госконтракту №П2475 в рамках выполнения ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 год.

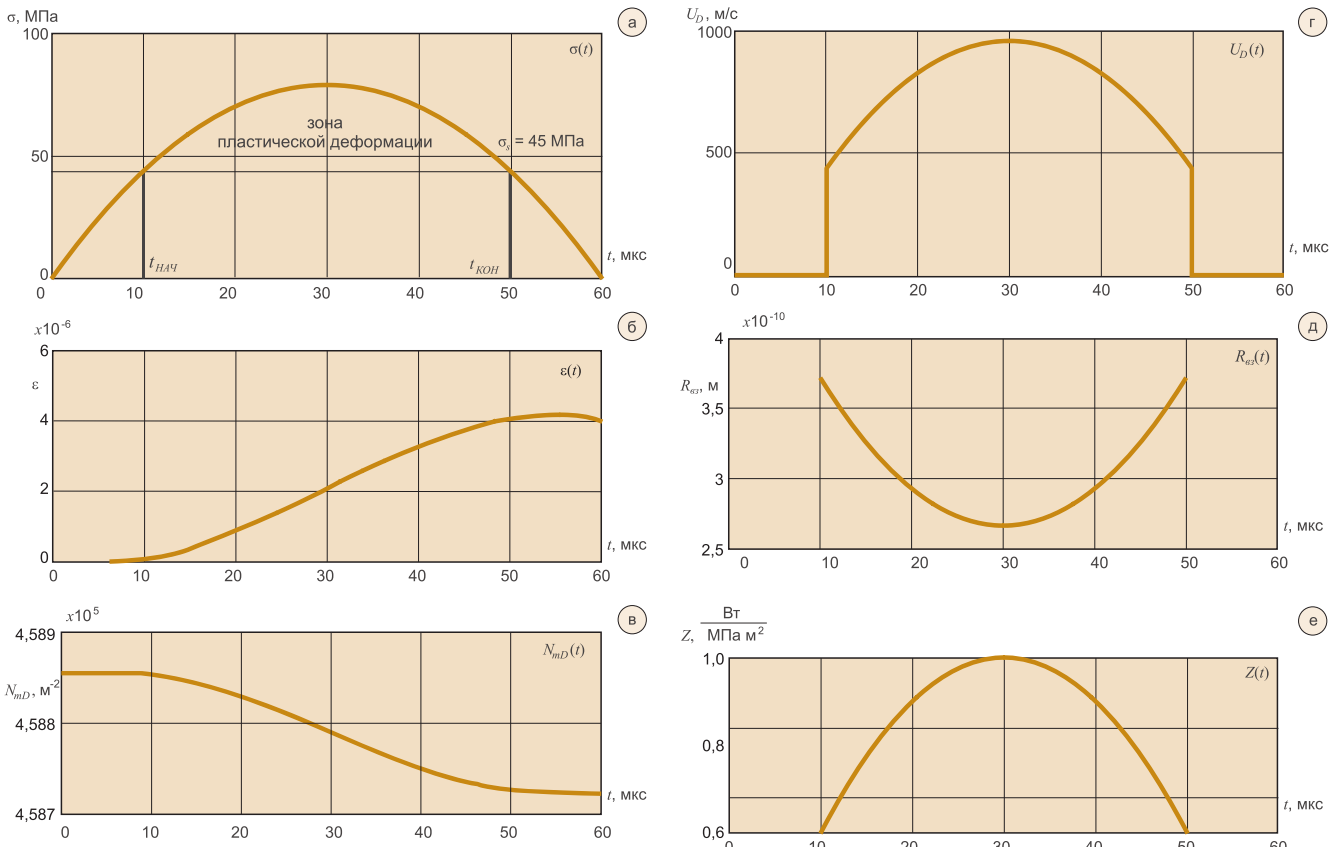


Рис. 2. Графический вывод основных величин, поэтапно определяемых в программе

а) импульс механического напряжения полусинусоидальной формы (с указанием области пластической деформации от  $t_{нач}$  до  $t_{кон}$ ); б) изменение пластической деформации во времени; в) изменение во времени плотности движущихся дислокаций (отмечается незначительное уменьшение плотности пластической деформации с течением времени); г) изменение скорости подвижных дислокаций (наблюдается повторение формы импульса нагружения); д) изменение радиуса взаимодействия движущейся дислокации с центром свечения (замечено уменьшение расстояния взаимодействия при увеличении механического напряжения); е) временная зависимость эффективной скорости изменения энергетической светимости (поэлементное произведение матриц  $NmD$  – в),  $UD$  – г) и  $RB3$  – д); ж) временная зависимость энергетической светимости (интеграл от функции  $z(t)$  при переменном верхнем пределе)

$$\begin{cases} \Phi(t) = 2N_{ЦС} \frac{\eta}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^{t_{\sigma}} r_{вз}(t) \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) dt; & (1) \\ \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) = \frac{3}{4} \frac{\dot{\epsilon}_1^p}{|\vec{b}|}; & (2) \end{cases}$$

где  $N_{ЦС}$  – общее количество ЦС в люминесцентном материале ЧЭ;  $\eta$  – энергия кванта света;  $\tau$  – время жизни возбужденного состояния;  $t_{\sigma}$  – длительность возбуждения ЦС импульсом давления  $\sigma(t)$ ;  $r_{вз}$  – радиус взаимодействия дислокации с ЦС;  $\tilde{N}_{mD}$  – средняя плотность подвижных дислокаций;  $\tilde{U}_D$  – скорость движения дислокаций, усредненная по дислокационному массиву;  $|\vec{b}|$  – модуль вектора Бюргерса, характеризующий область искажения кристаллической решетки дислокацией определенного типа;  $\dot{\epsilon}_1^p$  – скорость роста пластических деформаций;  $t$  – текущее время.

Здесь интенсивность МЛ определяется числом квантов света в единицу времени и описывается форму-

лой (1). Напряженно-деформированное состояние ЧЭ было проанализировано с использованием микродинамической теории пластичности, что позволило связать параметры, определяющие кинетику упругопластического деформирования, с макроскопическими параметрами удара – механическим напряжением и деформацией [3-6]. Механическое воздействие  $\sigma(t)$  на МЛЧЭ вызывает его упругопластическое деформирование. Скорость роста пластической деформации определяется микропараметрами кинетики дислокаций (2).

Более подробно математическая модель и физические процессы, происходящие при МЛ преобразования, рассмотрены в работах [1, 7-8].

Учитывая конструктивные параметры и внутреннюю структуру сенсорного элемента, величину полного потока излучения, выводимого с площадки сенсорного элемента в оптический канал можно найти как

$$\Phi(t) = 0,5k_{\theta}k_n\Phi_1(t). \quad (3)$$

Расчеты светового потока, генерируемого МЛ сенсором давления при различных импульсных механических воздействиях, выполнены в среде MATLAB. Для решения обыкновенного дифференциального уравнения из библиотеки функций MATLAB была выбрана функция ode113. Это решатель переменного порядка, основанный на формуле Адамса – Башворта – Мултона. Он оказывается эффективнее привычного метода Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка при высоких требованиях к точности и в тех случаях, когда высока трудоемкость вычисления правых частей [9].

В программе определяются квантово-механические, электрические и кинетические характеристики механолюминесцентного материала на основе промышленного электролюминофора ЭЛС-580М (состав ZnS:Mn,Cu; весовое содержание марганца 1%). Было сделано допущение, что, материал представляет собой единую структуру сфалерита. В расчетах учитывалась только энергия квантов излучения, соответствующих максимуму спектра излучения марганцевых ЦС ( $\lambda = 580$  нм;  $\eta = 2,2$  эВ), так как интенсивность излучения медных ЦС приблизительно в 50 раз слабее. Кинетические параметры материала люминофора были определены с учетом технологии производства люминесцентных порошков. В проведенных расчетах принимались значения  $k_a = 1$ ,  $n_{cl} = 2$ ,  $d_{cp} = 10$  мкм,  $k_v = 0,6$ ,  $k_n = 1,4$ . Эти значения соответствуют изготовленным опытным образцам МЛ сенсора давления.

Кинетика затухания свечения соответствует внутрицентральной люминесценции [2], характерной для ZnS:Mn с постоянной времени  $\tau = 150$  мкс. Следует отметить, что экспериментальное сравнение чувствительности различных промышленных электролюми-

нофоров к механическому возбуждению показало, что наибольшей чувствительностью обладает именно люминофор ЭЛС-580М. Здесь первое уравнение системы (1-2) было преобразовано с учетом формулы (3) к виду

$$R(t) = k_n N_{uc(1)} \frac{\eta}{\tau_a} \exp\left(-\frac{\eta}{\tau_a} t\right) \int_0^t r_{\sigma} \tilde{N}_{mD}(t) \tilde{U}_D(t) dt. \quad (4)$$

Проводился расчет энергетической светимости сенсора  $R(t)$ , то есть вычислялась величина потока, излучаемая сенсорным элементом с единичной площадью поверхности, равной  $1 \text{ м}^2$ . Входное воздействие в расчетах описывается одиночным импульсом давления  $\sigma(t)$ . Результаты расчетов энергетической светимости механолюминесцентного сенсора при различных входных давлениях приведены на рисунках 3, 4 и 5. Достоинством методики расчета является определение выходного оптического сигнала в абсолютных единицах энергетической светимости, пригодных для расчета схемы включения ФП.

Алгоритм вычисления светового потока при механическом нагружении люминофора с внутрицентральной люминесценцией показан на рис. 1.

На рис. 2. представлены графики ключевых величин, поэтапно вычисляемых в программе.

Анализ выходных оптических сигналов МЛ сенсорного элемента показывает, что амплитуда и длительность световых импульсов существенно зависят не только от амплитуды, но и от длительности импульсов давления. При уменьшении амплитуды и крутизны волны давления наблюдается временная задержка в появлении излучения, которая определя-

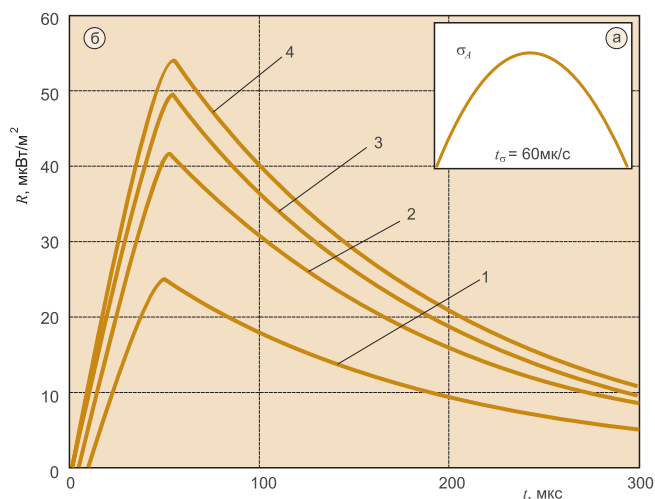


Рис. 3. Расчетные зависимости энергетической светимости МЛ сенсорного элемента при воздействии импульсов давления одинаковой длительности и различной амплитуды: а) параметры импульса давления; б) светимость МЛ сенсора: 1 -  $\sigma A = 60$  МПа; 2 -  $\sigma A = 120$  МПа; 3 -  $\sigma A = 200$  МПа; 4 -  $\sigma A = 340$  МПа

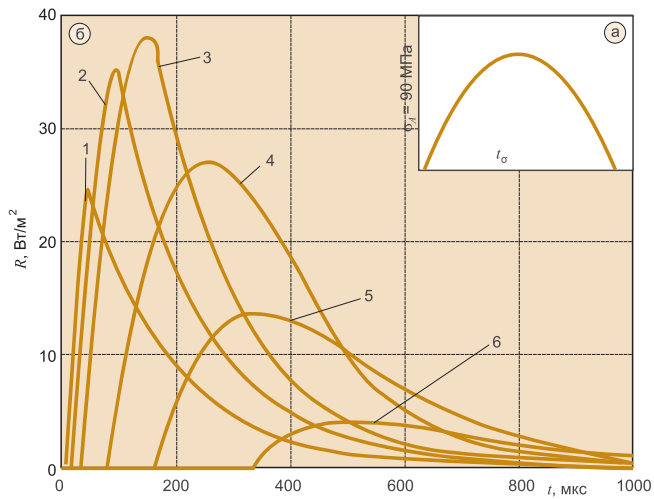


Рис. 4. Расчетные зависимости энергетической светимости МЛ сенсорного элемента при воздействии импульсов давления одинаковой амплитуды и различной длительности: а) параметры импульса давления; б) светимость МЛ сенсора: 1 -  $\sigma t = 60$  мкс; 2 -  $\sigma t = 120$  мкс; 3 -  $\sigma t = 400$  мкс; 4 -  $\sigma t = 340$  МПа; 5 -  $\sigma t = 1000$  мкс; 6 -  $\sigma t = 2000$  мкс

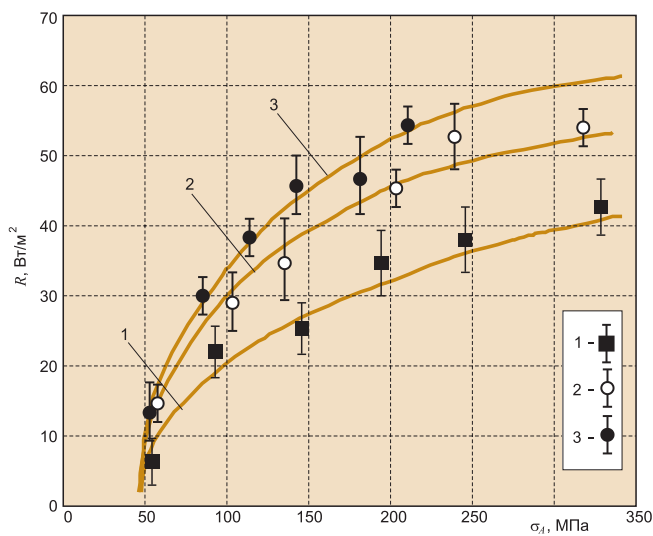


Рис. 5. Зависимости амплитуды энергетической светимости МЛЧЭ от амплитуды полусинусоидального импульса давления различной длительности: 1 –  $t_\sigma = 40$  мкс; 2 –  $t_\sigma = 60$  мкс; 3 –  $t_\sigma = 80$  мкс; сплошными линиями показаны результаты расчета; точками показаны экспериментальные результаты

ется временем достижения давления, равного пределу текучести материала сенсора (рис. 3).

Это подчеркивает пороговый характер функции преобразования МЛ сенсора, то есть в пределах упругих деформаций генерация излучения практически не происходит. Наблюдается временной сдвиг между максимумом давления и максимумом излучения, причем величина сдвига растет с увеличением продолжительности нагружения (рис. 4).

Это объясняется тем, что фактически одновременно протекают два конкурирующих процесса. В первом процессе с разной скоростью может происходить накопление возбужденных ЦС. Скорость их накопления зависит преимущественно от скорости нарастания дав-

ления. Второй процесс имеет постоянную скорость перехода возбужденных ЦС в исходное состояние и определяется экспоненциальным множителем в формуле (4). Соответственно, если скорость возбуждения будет много больше скорости возврата, то будет наблюдаться интенсивное излучение с крутым фронтом нарастания. В противном случае концентрации возбужденных ЦС не хватит, чтобы появилось заметное излучение, хотя полная деформация сенсора может быть значительно больше, чем в первом случае.

Длительность оптического сигнала МЛ сенсора давления на восходящей ветви практически во всех случаях в несколько раз больше длительности  $t_\sigma$ . На нисходящей ветви длительность свечения значительно уменьшается. Снижение амплитуды и длительности излучения с ростом  $t_\sigma$  объясняет отсутствие излучения при статическом воздействии. Ход процессов возбуждения ЦС в этом случае не изменяется, однако нарушение условия накопления возбужденных ЦС приводит к сильному снижению интенсивности излучения за счет увеличения его продолжительности.

Это подчеркивает существенные динамические свойства МЛ сенсорного элемента и сложность определения коэффициента преобразования сенсора в целом. Для оценки применимости МЛ сенсора давления следует сначала рассчитать реакцию сенсора на возможные предельные значения входного механического воздействия, а далее оценить возможность использования полученных реализаций для последующей регистрации конкретной аппаратурой.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что отклонения расчетных значений от экспериментальных не превосходят 10%. На рис. 5 приведен результат оценки зависимости амплитудного значения светимости от уровня амплитуды импульса механического напряжения. Точками указан разброс экспериментальных резуль-

### На предприятиях пивоваренной компании "Балтика" создана корпоративная беспроводная сеть на базе решений Cisco

Летом 2010 г. был завершен проект по развертыванию в головном офисе и на предприятиях ОАО "Пивоваренная компания "Балтика" унифицированной беспроводной корпоративной сети с использованием решений Cisco Unified Wireless. Цель проекта - оптимизация работы мобильных сотрудников компании за счет унификации доступа к корпоративной сетевой инфраструктуре независимо от местоположения. Вопрос консолидации сетевых ресурсов и дополнения существующей корпоративной инфраструктуры беспроводным сегментом был поднят в связи с большой численностью персонала и географической удаленностью предприятий и офисов друг от друга.

По результатам конкурса исполнителем проекта была выбрана компания КОМПЛИТ. В Центре высоких технологий КОМПЛИТ смоделировали архитектуру новой беспроводной сети для ОАО "Пивоваренная компания "Балтика" и провели ее тестирование. В основу сети была положена архитектура Cisco Unified Wireless, сочетающая проводные и беспроводные компоненты и отличающаяся высочайшим уровнем защиты. Cisco Unified Wireless Network позволяет получить доступ к критически важным для бизнеса приложениям и дает возможность со-

здать защищенное, мобильное и интерактивное рабочее пространство на территории всех организаций, использующих беспроводные сети.

Успешно реализовав пилотный проект в головном офисе, специалисты КОМПЛИТ внедрили беспроводные сети на базе решения Cisco Unified Wireless Network и в региональных офисах компании. Затем к зоне действия унифицированной беспроводной сети были добавлены все производственные площадки компании, что позволило предоставить сотрудникам компании, а также гостям и партнерам беспроводной доступ к корпоративным ресурсам и выход в Internet в любой точке присутствия компании. Помимо этого, в рамках проекта был создан единый механизм мониторинга системы и управления компонентами корпоративной инфраструктуры, обеспечивающий высокую и предсказуемую производительность, а также надежность и стабильность мобильного доступа. Используемая специалистами КОМПЛИТ методология совмещения сетей различной архитектуры позволила сократить операционные расходы на внедрение и обслуживание решения и снизить совокупную стоимость владения сетевой инфраструктурой в целом.

[Http://www.complete.ru](http://www.complete.ru), [www.cisco.ru](http://www.cisco.ru)

татов – амплитуды оптического сигнала датчика при разных нагрузениях по длительности и амплитуде. Из рисунка видно, что экспериментальные данные отклоняются от расчетных значений, указанных сплошными линиями, на допустимую погрешность ( $\leq 10\%$ ). Это доказывает адекватность и применимость разработанной математической модели МЛ сенсора для измерения ударного давления.

#### Выводы

1. Разработана математическая модель МЛ сенсора давления на основе цинк-сульфидных кристаллофосфоров. Модель основывается на четкой трактовке физических процессов, приводящих к механолюминесценции. Разработанная методика расчета выходных оптических сигналов МЛ сенсора позволяет определять величину сигнала в абсолютных единицах измерения светового потока. Модель учитывает особенности конструкции сенсорного элемента и пригодна для расчета выходных сигналов МЛ сенсора любого типа.

2. Результаты расчетов показывают, что, во-первых, функция преобразования сенсора имеет явно выраженный порог чувствительности, во-вторых, функция преобразования имеет существенно нелинейный характер, в-третьих, форма выходных оптических сигналов значительно отличается от формы входных импульсов давления.

3. Модель позволяет рассчитывать процессы изменения плотности дислокаций при механических воздействиях на любые полупроводники с учетом предыстории и длительности напряженно-деформированного состояния.

4. Разработанная математическая модель механолюминесцентного преобразования может использоваться при проектировании алгоритмов системы обработки механолюминесцентного излучения с целью вычисления входного механического воздействия.

#### Список литературы

1. *Татмышевский К.В., Макарова Н.Ю.* Механолюминесцентный сенсорный элемент: математическая модель и расчет выходных оптических сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2004. №1.
2. *Гураич А.М.* Введение в физическую химию кристаллофосфоров. – М.: Высшая школа, 1982.
3. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Под ред. Ю.А. Осипьяна. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
4. *Велиев З.А., Шикин В.Б.* О движении заряженных дислокаций в полупроводниках A2B6 // Физика твердого тела. 1985. № 9. т. 27.
5. *Нигматулин Р.И., Холин Н.Н.* К модели упругопластической среды с дислокационной кинетикой пластического деформирования // Механика твердого тела. 1974. № 4.
6. *Гилман Дж.* Микродинамическая теория пластичности // Микропластичность. М.: Металлургия, 1972.
7. *Татмышевский К.В., Макарова Н.Ю.* Механолюминесцентные сенсоры для измерительных систем с волоконно-оптическими линиями связи // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. № 4.
8. *Татмышевский К.В., Макарова Н.Ю.* Механолюминесцентные датчики импульсного давления. Обработка выходного оптического сигнала // Измерительная техника. 2007. № 10.
9. *Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М.* MATLAB 6.x.: программирование численных методов. – СПб: БХВ-Петербург, 2004.

*Татмышевский Константин Вадимович – д-р техн. наук, доцент,  
Макарова Наталья Юрьевна – канд. техн. наук, доцент,  
Павлов Дмитрий Дмитриевич – ассистент кафедры  
"Приборостроение и информационно-измерительные технологии"  
Владимирского государственного университета (ВлГУ).*

*Контактный телефон (4922) 279-792. E-mail: tatmysh@mail.ru, mak-nat@inbox.ru, pavlovdd84@mail.ru*

#### SCADA-пакет PcVue на предприятиях по обработке бытовых и промышленных отходов (включая опасные материалы) крупнейшего во Франции холдинга Seche Environnement Group

Компания ARC Informatique (разработчик SCADA-пакета PcVue) и "ФИОРД" (официальный дистрибьютор PcVue в России) информируют о том, что французский холдинг Seche Environnement Group и его филиал Tredi (специализирующийся на обработке опасных материалов) используют SCADA-пакет PcVue в качестве единой корпоративной платформы для управления и мониторинга всех установок по сжиганию бытовых и промышленных отходов и электростанций на биогазе. С момента своего первого внедрения в 2005 г. PcVue был установлен на 16 заводах, представляющих более чем 500 тыс. переменных, которые принимаются, обрабатываются и регистрируются.

SCADA-пакет PcVue впервые был установлен на промышленной площадке в Salaise Sur Sanne (Isere, France) в 2005 г. Это крупнейший центр по тепловой обработке и возобновляемым источникам энергии, где ежегодно обрабатывается около 250 тыс. т опасных отходов (HW), неопасных промышленных отходов (NHIW), бытовых отходов и клинические отходы. Приоритетной задачей центра является определение

стандартов и специальной библиотеки для таких объектов в среде PcVue и логических контроллеров.

PcVue поэтапно внедрялась на 1, 2 и 3 установках на площадке Salaise. Проект начался с полностью перестроенной установки 1 с двумя вращающимися печами. Здесь PcVue контролирует все функции процесса и общие задачи, охватывающие около 30000 переменных. Затем была модернизирована установка 2 с новой системой впрыска отходов. Эта модернизация была особенно актуальна после инцидента с незаконным сбросом отходов в Кот-д'Ивуаре. Обновление установки 3 проводится в настоящее время, включая полную замену системы управления. Используются ПЛК Telemecanique под управлением Unity и PcVue (два сервера ввода/вывода и 5 клиентских станций).

Seche Group также использует PcVue для мониторинга электростанций, которые сжигают биогаз от центров хранения бытовых отходов. Их дренажные и насосные сети собирают этот продукт, созданный из отходов разложения (главным образом метан). Биогаз передается в газовые турбины для производства электроэнергии.

[Http://www.arcinfo.com](http://www.arcinfo.com) и [www.fiord.com](http://www.fiord.com)