

Раздел I. Электроника и нанотехнологии

УДК 621.373.826

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-411

Е.А. Рындин, А.С. Исаева

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКИХ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПЛЕНКАХ

Механолюминесцентные пленки в настоящее время привлекают внимание ученых и инженеров в качестве перспективных материалов не только для разработки различных датчиков физических величин в роботизированных технических комплексах, но и с целью создания новых перспективных систем неразрушающего контроля. Механолюминесценция определяется как явление излучения в видимой или инфракрасной областях спектра, которое возникает в материале под действием механических напряжений в нем. Данные механические напряжения могут возникать как результат статических, динамических или импульсных полей давлений или деформаций. Например, при образовании поверхностной трещины, области наибольших механических напряжений расположены в ее вершинах, так как они являются концентраторами напряжений, что и способствует дальнейшему развитию трещины. Значения механических напряжений в подобных концентраторах напряжений может значительно превосходить значения напряжений, которыми воздействуют на конструкцию в целом. При исследовании механолюминесцентных материалов широко используют математические модели, связывающие поток излучения механолюминесценции с вызывающими данный поток деформационными напряжениями в материале. В то же время при проведении экспериментальных исследований механолюминесценции механические напряжения в механолюминесцентных материалах удобно инициировать путем воздействия на материал лазерных импульсов малой длительности, что, в свою очередь, приводит к необходимости установления соответствия между величиной механического напряжения в механолюминесцентном материале и параметрами лазерного импульса, инициировавшего данное механическое напряжение. Поскольку экспериментально установить данное соответствие в большинстве случаев затруднительно, в данной работе предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать термомеханические напряжения, которые возникают в тонких пленках под воздействием лазерных импульсов малой длительности, производить оценку длительности переходных процессов в тонкой пленке, а также определять профиль и параметры лазерного луча, необходимые для получения требуемых механических напряжений и температур в механолюминесцентных пленках. Разработанная модель включает нестационарное уравнение теплопроводности и уравнения термоупругости, которые решаются численно с применением метода конечных разностей.

Механолюминесценция; математическая модель; уравнение термоупругости; уравнение теплопроводности; механические напряжения.

Е.А. Ryndin, A.S. Isaeva

NUMERICAL MODELING OF THERMOMECHANICAL STRESSES GENERATED IN A THIN TRIBOLUMINESCENT FILMS UNDER LASER-PULSE ACTION

Triboluminescent films attract the attention of scientists and engineers as perspective materials not only for development of physical quantities sensors for robotic technical complexes, but also for creation of a new generation nondestructive testing systems. Triboluminescence is a visi-

ble or infrared light generated under the action of mechanical forces. Those mechanical forces may occur because of static, dynamic, or pulsing fields of pressure or deformation. For example, in the formation of surface cracks, the region of greatest stress are located in the vertices as they are stress concentrators, which contribute to further development of the crack. The values of the mechanical stresses in these stress concentrators may greatly exceed the stresses values, which affect the design as a whole. Mathematical models that associate the triboluminescent emitting flow with the mechanical forces, which produce that flow in materials, are widely used in triboluminescence studies. During the experimental studies of triboluminescence, the mechanical forces in triboluminescent materials are usually generated by short laser-pulse action. Therefore, it is necessary to set a correspondence between the value of mechanical forces in triboluminescent material and parameters of laser-pulse. In most cases, it is difficult to set this correspondence by experiment. In this paper proposed is the mathematical model that allows calculating the thermomechanical stresses generated in a thin triboluminescent film under laser-pulse action, estimating the duration transients, and determining the profile and parameters of laser beam. This model could be used for calculating the values necessary for obtaining requirement to mechanical forces and temperatures in triboluminescent films. The model consists of heat and nonstationary thermoelasticity equations, which are numerically solved by finite difference method.

Triboluminescence; mathematical model; thermoelasticity equation; heat equation; mechanical stresses.

Введение. Механолюминесцентные пленки в настоящее время привлекают внимание ученых и инженеров в качестве перспективных материалов для разработки не только различных датчиков физических величин в роботизированных технических комплексах, но и новых перспективных систем неразрушающего контроля [1–9].

Механолюминесценция представляет собой явление излучения в видимой или инфракрасной областях спектра, возникающее в материале под действием механических напряжений [1]. Данные механические напряжения могут возникать как результат статических, динамических или импульсных полей давлений или деформаций.

При исследовании механолюминесцентных материалов широко используют математические модели, связывающие поток излучения механолюминесценции с вызывающими данный поток деформационными напряжениями в материале [3, 10]. В то же время при проведении экспериментальных исследований механолюминесценции механические напряжения в механолюминесцентных материалах удобно инициировать путем воздействия на материал коротких лазерных импульсов, что, в свою очередь, приводит к необходимости установления соответствия между величиной механического напряжения в механолюминесцентном материале и параметрами лазерного импульса, инициировавшего данное механическое напряжение. Поскольку экспериментально установить данное соответствие в большинстве случаев затруднительно [11–13], целью данной работы является разработка математической модели, позволяющей рассчитывать термомеханические напряжения, возникающие в тонких пленках под воздействием лазерных импульсов, производить оценку длительности переходных процессов, а также определять профиль и параметры лазерного луча, необходимые для получения требуемых механических напряжений и температур в механолюминесцентных пленках.

Математическая модель. Решение данной задачи может быть выполнено посредством самосогласованного численного решения уравнения теплопроводности [15], описывающего нестационарное распределение температуры в механолюминесцентной пленке, возникающее в результате действия лазерного импульса, и уравнений термоупругости [14–15], позволяющих определить механические напряжения, возникающие вследствие теплового процесса в исследуемом материале.

В общем случае задачи теплопроводности и термоупругости решаются для трех пространственных измерений. Однако, с учетом того, что объектом исследования является тонкая механолюминесцентная пленка на массивном основании,

задачу термоупругости целесообразно решать для двух пространственных измерений, а уравнение теплопроводности – для трех с последующим преобразованием полученного трехмерного нестационарного распределения температуры в двухмерное в соответствии с выражением:

$$T(x, y, t) = \max_z \{T(x, y, z, t)\}, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура; t – время; x, y, z – координаты; $\max_z \{T(x, y, z, t)\}$ – максимальное значение температуры по толщине пленки (вдоль координаты z) в точке (x, y) в момент времени t .

Необходимость численного решения уравнения теплопроводности для трех пространственных измерений обусловлена тем, что при решении двухмерной задачи теплопроводности тепловой поток лазерного излучения на поверхность исследуемой механолюминесцентной пленки может быть задан лишь как эквивалентный внутренний источник тепла, что не вполне некорректно. С учетом рассмотренных уточнений, разрабатываемая система уравнений может быть представлена в следующем виде:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - A \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} = 0; \quad (2)$$

$$T(x, y, t) = \max_z \{T(x, y, z, t)\}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial y^2} + E \alpha_T \left\{ \frac{\partial^2 (T - T_0)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (T - T_0)}{\partial y^2} \right\} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

где ρ – плотность материала механолюминесцентной пленки; C – удельная теплоемкость; A – поглощательная способность материала пленки; λ – коэффициент теплопроводности; E – модуль Юнга; α_T – коэффициент линейного теплового расширения; $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$ – компоненты тензора механического напряжения; T_0 – начальная температура материала пленки.

Особенностью полученной системы уравнений (2)–(6) является сочетание дифференциальных уравнений 2-го порядка (2) и (4) с уравнениями 1-го порядка (5) и (6). Как показали результаты проведенных численных экспериментов, при дискретизации системы (2)–(6) на конечноразностной координатной сетке использование в уравнениях (5) и (6) левых или правых разностей первого порядка нарушает симметрию решения и приводит к неадекватным результатам. Использование центральных разностей для уравнений (5) и (6) также недопустимо, ввиду появления нулевых значений на главной диагонали матрицы коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений, полученных в результате дискретизации системы (2)–(6).

В данной работе для решения этой проблемы выполнено дифференцирование уравнений 1-го порядка (5), (6) следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial y^2} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial y^2} = 0; \\ \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial x \partial y} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Далее в результате почленного вычитания уравнений (7) и почленного сложения уравнений (8) получим:

$$\frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial y^2} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial x \partial y}. \quad (10)$$

С учетом полученных уравнений (9) и (10), система (2)–(6) примет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - A \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} = 0; \quad (11)$$

$$T(x, y, t) = \max_z \{T(x, y, z, t)\}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial y^2} + E \alpha_T \left\{ \frac{\partial^2 (T - T_0)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (T - T_0)}{\partial y^2} \right\} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial y^2} = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial x \partial y}. \quad (15)$$

Начальное условие для уравнения теплопроводности (11) имеет вид:

$$T(x, y, z, t_{\min}) = T_0(x, y, z), \quad (16)$$

где t_{\min} – начальный момент времени; $T_0(x, y, z)$ – распределение температуры по координатам в момент времени t_{\min} .

Преобразование уравнений 1-го порядка (5), (6) в уравнения 2-го порядка (14), (15) требует введения дополнительных граничных условий. С учетом данного аспекта, граничные условия для системы (11)–(15) могут быть представлены в виде:

$$T(x, y_{\min}, z) = T_0(x, y_{\min}, z); \quad T(x, y_{\max}, z) = T_0(x, y_{\max}, z); \quad (17)$$

$$T(x_{\min}, y, z) = T_0(x_{\min}, y, z); \quad T(x_{\max}, y, z) = T_0(x_{\max}, y, z); \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{x^2+y^2 > \frac{D^2}{4}} = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{x^2+y^2 \leq \frac{D^2}{4}} = -\frac{4E_L}{\pi D^2 \tau \lambda} \exp\left(-\frac{8(x^2 + y^2)}{D^2}\right); \quad (19)$$

$$T(x, y, z_{\max}) = T_0(x, y, z_{\max}); \quad (20)$$

$$\sigma_{xx}(x, y_{\min}) = \sigma_{xx}(x, y_{\max}) = \sigma_{xx}(x_{\min}, y) = \sigma_{xx}(x_{\max}, y) = 0; \quad (21)$$

$$\sigma_{yy}(x, y_{\min}) = \sigma_{yy}(x, y_{\max}) = \sigma_{yy}(x_{\min}, y) = \sigma_{yy}(x_{\max}, y) = 0; \quad (22)$$

$$\sigma_{xy}(x, y_{\min}) = \sigma_{xy}(x, y_{\max}) = \sigma_{xy}(x_{\min}, y) = \sigma_{xy}(x_{\max}, y) = 0, \quad (23)$$

где x_{\min}, x_{\max} – координаты границ области решения задачи по оси x ; y_{\min}, y_{\max} – координаты границ области решения задачи по оси y ; z_{\min} – координата верхней (облучаемой лазером) границы пленки; z_{\max} – координата границы раздела пленки и основания; D – диаметр лазерного пучка на поверхности пластины; E_L – энергия лазерного импульса; τ – длительность лазерного импульса.

Областью применения рассматриваемой модели является исследование влияния температурного поля на механические напряжения в тонкой механолюминесцентной пленке в приближении идеальной адгезии пленки к подложке и при малых временах воздействия лазерного импульса ($10^{-3} - 10^{-6}$), что, в соответствии с [9], позволяет не учитывать влияние тепловых свойств подложки на процесс нагрева пленки.

Граничные условия (17)–(23) записаны с учетом следующих допущений:

- ◆ температура нижней границы исследуемой пленки определяется температурой подложки, на которую нанесена пленка (условие (20));
- ◆ в течение переходного процесса температура на боковых границах области решения задачи не изменяется во времени (условия (17), (18));
- ◆ теплоотдачей с областей верхней границы пленки, на которые не воздействует лазерный импульс, можно пренебречь (первое из условий (19));
- ◆ на поверхности пленки, подверженной воздействию лазерного импульса (в пределах лазерного пятна диаметром D), задается тепловой поток, определяемый энергией и длительностью лазерного импульса (второе из условий (19)). Вид правой части данного граничного условия определяется распределением плотности мощности по площади поперечного сечения лазерного луча (в приведенном выражении – гауссовское распределение [17]);
- ◆ предполагается отсутствие механических напряжений на боковых границах (условия (21)–(23)), что накладывает определенные ограничения на минимальные размеры исследуемой области пленки в направлениях осей x и y .

Результаты моделирования. Для решения системы (11)–(23) с использованием метода конечных разностей разработан пакет прикладных программ [18–19], позволяющий получать результаты численного моделирования распределений температуры и компонент тензора механических напряжений для произвольного распределения плотности мощности по площади воздействия лазерного импульса и по времени. На рис. 1 приведены результаты численного моделирования процессов воздействия лазерных импульсов на механолюминесцентную пленку сульфида цинка (ZnS), теплофизические параметры которого приведены в табл. 1 [20]. Решение задачи получено в предположении, что упругие характеристики и коэффициент линейного теплового расширения исследуемого материала постоянны.

На рис. 1 приведены распределения по координатам температуры и компонент тензора напряжений σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} на поверхности пленки ZnS толщиной 10 мкм в момент прекращения действия прямоугольного лазерного импульса с плотностью мощности 283 Вт/мм^2 длительностью 9 мкс, сфокусированного в пятно диаметром 5 мм при гауссовском распределении плотности мощности по поперечному сечению луча.

Таблица 1

Теплофизические параметры ZnS [20]

Наименование параметра	Значение
Плотность материала, ρ	$4090 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$
Удельная теплоемкость, C	$124 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
Коэффициент теплопроводности, λ	$27,2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
Модуль Юнга, E	$7,4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$
Коэффициент линейного теплового расширения, α_T	$6,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

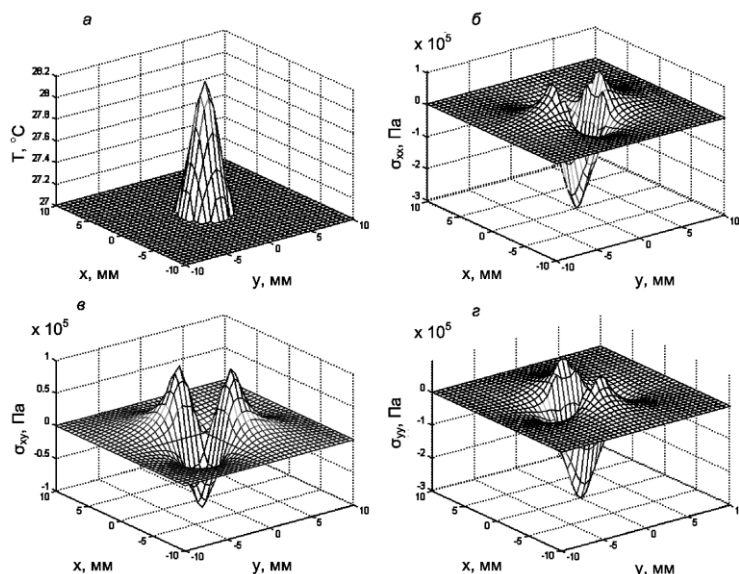


Рис. 1. Распределение по координатам температуры (а) и компонент тензора напряжений σ_{xx} (б), σ_{xy} (в), σ_{yx} (г) на поверхности пленки ZnS толщиной 10 мкм через 2,5 мкс после прекращения действия лазерного импульса

Полученные результаты численного моделирования позволяют осуществлять количественные оценки длительности переходных процессов изменения температуры и компонент тензора механических напряжений, возникающих при воздействии на механолюминесцентную пленку лазерным импульсом, в зависимости от теплофизических свойств материала пленки и ее толщины, что позволит связать экспериментально наблюдаемые интенсивности механолюминесцентного свечения со значениями компонент тензора напряжений при заданных параметрах лазерных импульсов.

Заключение. Таким образом, предложенная модель (11)–(23), а также разработанные методика и пакет прикладных программ численного моделирования [18] позволяют получать распределения по координатам и времени температуры и компонент тензора механических напряжений в исследуемой пленке, производить оценку длительности переходных процессов, а также определять профиль и параметры лазерного луча, необходимые для получения требуемых напряжений и температур в пленке, что представляется полезным при исследовании механолюминесцентных материалов.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-07-00018) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 8.797.2014К).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1971. – 336 с.
2. Скармоззино Р. О механизме излучения света в трибо-люминесцентных материалах // Lettere al Nuovo Cimento. – 1970. – P. 825-827.

3. *Татмышевский К.В.* Механолюминесцентный чувствительный элемент: математическая модель и основные характеристики // Датчики и системы. – 2005. – № 1. – С. 10-15.
4. *Макарова Н.Ю., Татмышевский К.В.* Процесс преобразования в механолюминесцентном сенсоре давления // Инженерная физика. – 2006. – № 1. – С. 1-6.
5. *Татмышевский К.В.* Механолюминесцентные (светогенерационные) сенсорные элементы для современных информационно-измерительных технологий // Микросистемная техника. – 2004. – № 12. – С. 4-10.
6. *Банишев А.Ф., Большухин В.А., Азаров А.Д.* Механолюминесценция мелкодисперсного порошкообразного твердого раствора $\text{SrAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$, возбуждаемая воздействием лазерных импульсов // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 3. – С. 24-27.
7. *Li C., Xu C.N., Zhang L., Yamada H., Imai Y.* Dynamic visualization of stress distribution on metal by mechanoluminescence images // J. Visualization. – 2008. – Vol. 11, No. 4. – P. 329-335.
8. *Sage I., Bourhill G.* Triboluminescent materials for structural damage monitoring // J. Mater. Chem. – 2001. – No. 11. – P. 231-245.
9. *Татмышевский К.В.* Классификация и особенности применения механо-люминесцентных датчиков давления // Датчики и системы. – 2004. – № 12. – С. 30-33.
10. *Абрамова К.Б., Щербакова И.П., Русаков А.И., Семенов А.А.* Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41. – Вып. 5. – С. 841-843.
11. *Tcherniega N.V., Zemskov K.I., Savranskii V.V., Kudryavtseva A.D.*, X-ray generation induced by visible lasers in ZnS aqueous suspensions // Journal of Russian Laser Research. – 2011. – Vol. 32, No. 3. – P. 247-252.
12. *Морозова Н.К., Каретников И.А., Блинов В.В., Гаврищук Е.М.* Исследование центров люминесценции, обязанных присутствию меди и цинка в ZnSe // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 1. – С. 25-33.
13. *Абрамова К.Б., Щербаков И.П.* Люминесценция, возбуждаемая в металлах при механических нагрузениях // ЖТФ. – 1994. – Т. 64, № 9. – С. 75-88.
14. *Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов / под общ. ред. В.П. Вейко – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2011. – 184 с.
15. *Коваленко А.Д.* Основы термоупругости. – Киев: Наукова думка, 1970. – 304 с.
16. *Князева А.Г.* Элементы теории упругости, термоупругости и массопругости и их приложение к описанию процессов термообработки: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 72 с.
17. *Рындин Е.А., Рыжук Р.В., Исаева А.С.* Математическая модель механических напряжений, инициированных лазерным импульсом // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11. – С. 609-614.
18. *Рындин Е.А., Исаева А.С.* Программа численного моделирования механических напряжений в материале, инициированных лазерным импульсом. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013610833. 2013.
19. *Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М.* MATLAB 6.x.: программирование численных методов. – СПб.: БХВ - Петербург, 2004. – 672 с.
20. *Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А.* Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. – К.: Наукова думка, 1982. – 286 с.

REFERENCES

1. *Gurvich A.M.* Vvedenie v fizicheskuyu khimiyu kristallofosforov: ucheb. posobie dlya vtuzov [Introduction to the physical chemistry of crystal phosphors: a training manual for VTU-call]. Moscow: Vyssh. shkola, 1971, 336 p.
2. *Skarmozzino P.* O mekhanizme izlucheniya sveta v tribo-lyuminescentnykh materialakh [On the mechanism of radiation of light in a tribo-luminescent materials], *Lettere al Nuovo Cimento*, 1970, pp. 825-827.
3. *Tatmyshevskiy K.V.* Mekhanolyuminescentnyy chuvstvitel'nyy element: matematicheskaya model' i osnovnye kharakteristiki [Mechanoluminescent sensing element: mathematical model and basic characteristics], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2005, No. 1, pp. 10-15.
4. *Makarova N.Yu., Tatmyshevskiy K.V.* Protsess preobrazovaniya v mekhanolyuminescentnom sensore davleniya [The conversion process in mechanoluminescent sensor pressure], *Inzhenernaya fizika* [Engineering physics], 2006, No. 1, pp. 1-6.

5. *Tatmyshevskiy K.V.* Mekhanolyuminestsentnye (svetogeneratsionnye) sensornye elementy dlya sovremennykh informatsionno-izmeritel'nykh tekhnologiy [Mechanoluminescent (svetoprozrachnye) touch elements for a modern information-measuring technologies], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technology], 2004, No. 12, pp. 4-10.
6. *Banishev A.F., Bol'shukhin V.A., Azarov A.D.* Mekhanolyuminestsentsiya melkodispersnogo poroshkoobraznogo tverdogo rastvora $\text{SrAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$, vzbuzhdaemaya vozdeystviem lazernykh impul'sov [Mechanoluminescence fine powdery solid solution $\text{SrAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$, excited by laser pulses], *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials processing], 2008, No. 3, pp. 24-27.
7. *Li C., Xu C.N., Zhang L., Yamada H., Imai Y.* Dynamic visualization of stress distribution on metal by mechanoluminescence images, *J. Visualization*, 2008, Vol. 11, No. 4, pp. 329-335.
8. *Sage I., Bourhill G.* Triboluminescent materials for structural damage monitoring, *J. Mater. Chem.*, 2001, No. 11, pp. 231-245.
9. *Tatmyshevskiy K.V.* Klassifikatsiya i osobennosti primeneniya mekhano-lyuminestsentnykh datchikov davleniya [Classification and application features of mechano-luminescence pressure sensors], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2004, No. 12, pp. 30-33.
10. *Abramova K.B., Shcherbakova I.P., Rusakov A.I., Semenov A.A.* Emissionnyye protsessy, soprovozhdayushchie deformirovanie i razrushenie metallov [Emission processes accompanying deformation and fracture of metals], *Fizika tverdogo tela* [Physics of the solid state], 1999, Vol. 41, Issue 5. – S. 841-843.
11. *Tcherniega N.V., Zemskov K.I., Savranskii V.V., Kudryavtseva A.D.*, X-ray generation induced by visible lasers in ZnS aqueous suspensions, *Journal of Russian Laser Research*, 2011, Vol. 32, No. 3, pp. 247-252.
12. *Morozova N.K., Karetnikov I.A., Blinov V.V., Gavrishchuk E.M.* Issledovanie tsentrov lyuminestsentsii, obyazannykh prisutstviyu medi i tsinka v ZnSe [The study of luminescence centers, which are obliged to the presence of copper and zinc in ZnSe], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technics of semiconductors], 2001, Vol. 35, No. 1, pp. 25-33.
13. *Abramova K.B., Shcherbakov I.P.* Lyuminestsentsiya, vzbuzhdaemaya v metallakh pri mekhanicheskikh nagruzheniyakh [Luminescence excited in metals during mechanical loading], *ZhTF* [Journal of Applied Physics], 1994, Vol. 64, No. 9, pp. 75-88.
14. *Yakovlev E.B., Shandybina G.D.* Vzaimodeystvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom (silovaya optika) [Interaction of laser radiation with matter (power optics)], *Konspekt lektsiy. Chast' II. Lazernyy nagrev i razrushenie materialov* [Lecture notes. Part II. Laser heating and fracture of materials], ed. by V.P. Veyko. St. Petersburg: SPb GU ITMO, 2011, 184 p.
15. *Kovalenko A.D.* Osnovy termouprugosti [Fundamentals of thermoelasticity]. Kiev: Naukova dumka, 1970, 304 p.
16. *Knyazeva A.G.* Elementy teorii uprugosti, termouprugosti i massouprugosti i ikh prilozhenie k opisaniyu protsessov termoobrabotki: uchebnoe posobie [Elements of the theory of elasticity, thermoelasticity and mesoporosity and their application to the description of heat treatment processes: a tutorial]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011, 72 p.
17. *Ryndin E.A., Ryzhuk R.V., Isaeva A.S.* Matematicheskaya model' mekhanicheskikh napryazheniy, initsirovannykh lazernym impul'som [Mathematical model of mechanical stresses initiated by a laser pulse], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2012, No. 11, pp. 609-614.
18. *Ryndin E.A., Isaeva A.S.* Programma chislennogo modelirovaniya mekhanicheskikh napryazheniy v materiale, initsirovannykh lazernym impul'som [Program of numerical simulation of mechanical stresses in the material initiated by the laser pulse] *Svidetel'stvo RF o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2013610833. 2013* [Certificate RF on state registration of program for computer No. 2013610833. 2013].
19. *Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul'ts M.M.* MATLAB 6.x.: programmirovaniye chislennykh metodov [MATLAB 6.x.: programming of numerical methods]. St. Petersburg: BKhV - Peterburg, 2004, 672 p.
20. *Frantsevich I.N., Voronov F.F., Bakuta S.A.* Uprugie postoyannyye i moduli uprugosti metallov i nemetallov. Spravochnik [Elastic constants and elasticity moduli of metals and nonmetals. Reference]. Kiev: Naukova dumka, 1982, 286 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.А. Смирнов.

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; e-mail: earyndin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634361374; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Исаева Алина Сергеевна – e-mail: isaevaas@gmail.com; тел.: +79889972166; к.т.н., научный сотрудник.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; email: earyndin@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634361374; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Isaeva Alina Sergeevna – e-mail: isaevaas@gmail.com; phone: +79889972166; research associate.

УДК 531.768

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-1219

В.В. Петров, А.С. Каменцев, И.И. Черепяхин, Д.А. Коваленко**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРА ВИБРАЦИИ
НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК
ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА**

Исследованы некоторые свойства пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС), сформированных на окисленных кремниевых подложках. Пленки получены по разработанной технологии. Образцы сегнетоэлектрических пленок ЦТС состава $Pb(Ti_xZr_{1-x})O_3$ были получены методом высокочастотного реактивного плазменного распыления в кислородной атмосфере на установке «Плазма 80-СЭ». Пленки напылялись на окисленные кремниевые пластины марки КЭФ-4,5, кристаллографической ориентации $\langle 111 \rangle$ и толщиной 380 мкм. Толщина пленки SiO_2 составляла 150 ± 20 нм, что обеспечивало минимизацию токов утечки с сегнетоэлектрической пленки на подложку. Толщина пленки ЦТС составляла $1,48 \pm 0,18$ мкм. С помощью рентгенофазового анализа установлено, что пленки имеют фазу ЦТС. Кристаллическая фаза ЦТС соответствует химической формуле $Pb(Ti_{0,5}Zr_{0,5})O_3$. На поверхности пленок ЦТС методом термического испарения в вакууме формировалась контактная металлизация. Формирование металлизации позволило проверить адгезионные свойства системы подложка (с подслоем SiO_2) – пленка ЦТС – металлические контакты. Адгезия свойства пленок ЦТС к поверхности оксида кремния позволяла выдерживать напряжения на разрыв равное $3,5 \cdot 10^4$ кг/м². Электрофизические свойства сегнетоэлектрических материалов исследовались по методу Сойэра-Тауэра. Были исследованы петли гистерезиса образцов пленок ЦТС для трех частот – 0,1; 1,0 и 10,0 Гц и влияние процесса «поляризации» на сегнетоэлектрические характеристики пленок. Показано, что наибольшее значение поляризации равно 0,0015 Кл/м² проявляется у образцов, исследованных на частоте 0,1 Гц, а наибольший вклад в поляризацию образцов вносят «медленные» домены. Разработана конструкция сенсора для исследования его чувствительности на воздействии амплитуды и частоты вибраций. Испытания сенсора проходили на электродинамическом стенде ВСВ-206200. Сенсор испытывался на воздействие ускорений от 0,08 до 5g в диапазоне частот от 2 до 90 Гц. Показано, что чувствительность в диапазоне частот от 2 до 5 Гц составляла 60–75 нКл/g. В указанном диапазоне частот чувствительность сенсора от величины ускорения не зависит. Сделан вывод о возможном практическом применении разработанных сенсоров.

Цирконат-титанат свинца; сегнетоэлектрики; высокочастотное реактивное распыление; поляризация; сенсор вибрации.