

К.В. Татмышевский
(г. Владимир, Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СЕНСОРА ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРЕДЫСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ

Рассмотрено математическое моделирование выходных сигналов механолюминесцентных сенсоров ударных воздействий, работающих по принципу прямого преобразования механической энергии удара в энергию оптического излучения с учетом предыдущей истории деформирования материала сенсора.

The problem of mathematical modeling of the output signals of mechanoluminescent shock sensors operating on the principle of direct conversion of the mechanical energy of impact into the energy of optical radiation taking into account the previous history of deformation of the sensor material is considered.

Ключевые слова: деформационная механолюминесценция, механолюминесцентный сенсор.

Keywords: deformation mechanoluminescence, mechanoluminescent sensor.

Вывод о перспективности применения механолюминесцентных сенсоров (МЛС) в устройствах регистрации импульсного давления [1, 2] вызвал необходимость разработки математической модели МЛС и исследование на её основе закономерностей формирования выходных оптических сигналов в зависимости как от параметров входных импульсов импульсного давления, так и внутренней структуры материала МЛС [3]. Особый интерес для изучения представляет механолюминофор на основе соединения $ZnS:Mn$, обладающий наибольшей яркостью свечения и представляющий собой полупроводник класса A_2B_6 с широкой запрещенной зоной.

Показано [4], что МЛ в соединениях A_2B_6 является следствием процесса движения дислокаций, сопровождающих пластическую деформацию кристаллов микропорошка. Дислокации в полупроводниках A_2B_6 обладают сильным электрическим зарядом. В процессе пластического деформирования происходит взаимодействие марганцевых центров свечения (ЦС) с электрическим полем движущихся заряженных дислокаций, которое приводит к возбуждению ЦС с их последующими излучательными переходами, формирующими выходной оптический сигнал МЛС.

Математическая модель МЛС представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений, основой которой является уравнение (1)

светового потока люминесценции как функции времени (кривая высвечивания)

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

где k_B – коэффициент, учитывающий особенности вывода излучения; $N_{\text{ЦС}}$ – общее количество ЦС в люминесцентном материале; η – энергия кванта света; τ – постоянная времени экспоненциального затухания свечения (150 мкс); t_σ – длительность возбуждения ЦС импульсом давления $\sigma(t)$; $r_{\text{вз}}$ – 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; $\dot{\varepsilon}_1^p$ – скорость роста пластических деформаций; t – текущее время. Уравнение (2) описывает кинетику пластической деформации.

Совместное решение системы интегро-дифференциальных уравнений кривой высвечивания и кинетики пластического деформирования сенсора было выполнено в среде MATLAB [3]. Для решения обыкновенного дифференциального уравнения была выбрана функция `ode113` из библиотеки функций MATLAB. Она представляет собой решатель переменного порядка, основанный на формуле Адамса – Башворта – Мулттона. Для вычисления определенного интеграла использовался метод квадратур - `quad`.

Отдельные блоки программы рассчитывали квантово-механические, электрические и кинетические дислокационные параметры механолюминесцентного люминофора ЭЛС-580 (ZnS:Mn).

В соответствии с основами теории дислокационной микропластичности при каждом акте пластической деформации будет изменяться и дислокационная структура кристалла. Причём направление изменений дислокационной структуры будут зависеть от её фактического состояния и предыстории механических нагрузжений [5, 6].

Если положение рабочей точки материала на известной диаграмме $\sigma(\varepsilon)$ находится правее площадки текучести, то с действием каждого последующего импульса давления общая плотность дислокаций должна возрастать, а плотность подвижных дислокаций должна уменьшаться. Тогда уменьшение плотности подвижных дислокаций в соответствии с микродинамической теорией пластичности [6] должно приводить к снижению интенсивности излучения с каждым новым циклом. Для оценки величины уменьшения амплитуды светимости при многократном действии импульса давления было проведено численное моделирование. В программе расчета конечная общая плотность дислокаций после действия предыдущего

импульса давления подставлялась как начальная плотность дислокаций для следующего цикла нагружения.

Расчеты проводились для многократного действия импульсов давления полусинусоидальной формы с амплитудами $\sigma_A=90$ МПа и $\sigma_A=180$ МПа. Длительность воздействующего импульса давления составляла $t_\sigma=60$ мкс, пауза между смежными импульсами намного превышала время релаксации. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

Здесь видно, что в первом случае спад интенсивности излучения после 10^5 циклов нагружения составил 0,12%, а во втором – 0,23% от своего начального значения.

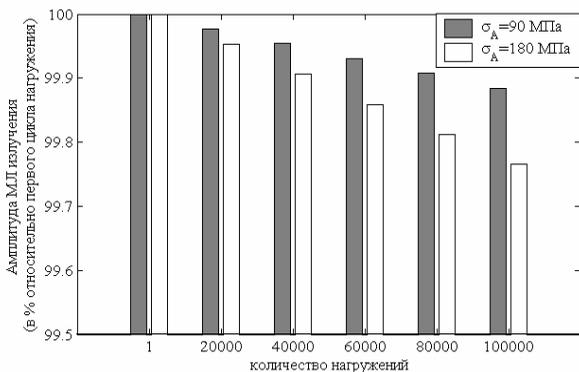


Рис. 1. Влияние числа циклов нагружения на амплитуду выходного оптического сигнала (энергетической светимости) МЛС

Полученные величины спада излучения незначительны и позволяют сделать вывод о возможности применения механолюминесцентных чувствительных элементов в условиях воздействий многократных импульсных давлений.

Список литературы

1. Власов, А.С. Перспективы применения механолюминесцентных сенсорных элементов/ А.С. Власов, К.В. Татмышевский // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 1-4 (55). – С.42-43.
2. Sage I., Bourhill G. Triboluminescent materials for structural damage monitoring // J. Mater. Chem., 2001. № 11. P. 231-245.
3. Татмышевский, К.В. Механолюминесцентные датчики для регистрации ударных воздействий// Динамика систем, механизмов и машин. –2017. –Т.5. –№4. –С.264-271.
4. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках/ под ред. Ю.А.Осипьяна. –М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 320 с.
5. Тейлор, Дж. Динамика дислокаций и динамическая текучесть/ Дж. Тейлор //Механика. –М., 1966. – №4. – С. 145-152.
6. Гилман, Дж. Микродинамическая теория пластичности / Дж. Гилман // Микропластичность. –М.: Металлургия, 1972. –С. 18-37.

Материал поступил в редколлегию 12.10.18.