

УДК 538.9

## МАГНИТООПТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ

© 2019 г. А. А. Климов<sup>1,3</sup>, Н. Тирселин<sup>3</sup>, В. Л. Преображенский<sup>2,3,\*</sup>,  
А. С. Сигов<sup>1,3</sup>, Ф. Перно<sup>3</sup>

*Международная лаборатория LIA LICS:*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“МИРЭА – Российский технологический университет”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики  
имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Университет Лилля, Лилль, Франция

\*E-mail: preobr@newmail.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Экспериментально и теоретически продемонстрирована возможность использования магнитооптического эффекта Керра в тонких магнитоэлектрических пленках для исследования пьезоэлектрических характеристик сегнетоэлектриков. В качестве объекта исследования рассмотрен кристалл сегнетоэлектрика PMN-PT  $\langle 011 \rangle$  с нанесенной на его поверхность магнитоэлектрической наноструктурой  $N^*(\text{TbCo}_2/\text{FeCo})$ .

DOI: 10.1134/S0367676519070202

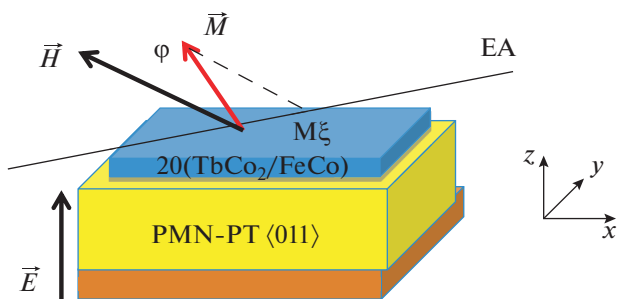
### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы многочисленные исследования влияния деформации на физические свойства материалов и структур сформировались в перспективное направление твердотельной электроники, получившее общее название стрейнтроники [1]. Ярким примером применения стрейнтронного принципа для создания материалов с новыми свойствами являются искусственные мультиферроики, состоящие из упруго связанных (strain-mediated) магнитоэлектрических и пьезоэлектрических компонентов. Такие материалы характеризуются сильной магнитоэлектрической связью, что представляет значительный интерес для разнообразных технических приложений. Одним из интенсивно исследуемых приложений является магнитоэлектрическая память со случайным доступом (MELRAM) и ультранизким энергопотреблением [2, 3]. Основу элементов такой памяти составляют гетероструктуры, содержащие магнитоэлектрические пленки или наночастицы с би- или мультистабильной магнитной системой, нанесенные на сегнетоэлектрические подложки. Определяющую роль в формировании магнитоэлектрического взаимодействия в таких гетероструктурах играет анизотропный пьезоэф-

фект в сегнетоэлектрике, создающий в магнитной пленке деформацию, симметрия которой обеспечивает переключение намагниченности между различными стабильными состояниями [4]. Для экспериментального исследования пьезоэффекта обычно используют либо резистивные тензодатчики, наклеиваемые на исследуемый образец, либо ультразвуковые и резонансные акустические методы. Применение этих методов становится затруднительным для образцов малых размеров или сложной топологии, представляющих интерес для стрейнтронных приложений. В настоящей работе демонстрируется принцип локального исследования пьезоэлектрических деформаций с помощью магнитооптического эффекта Керра (МОКЕ) в магнитоэлектрической пленке, нанесенной на поверхность сегнетоэлектрика.

### ПРИНЦИП И РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЬЕЗОДЕФОРМАЦИИ

В качестве объекта исследования пьезодеформаций использован сегнетоэлектрический кристалл PMN-PT среза  $\langle 011 \rangle$  толщиной 300 мкм с электродом, нанесенным на его нижнюю поверх-



**Рис. 1.** Геометрия эксперимента по магнитооптическому исследованию анизотропных пьезоэлектрических деформаций в кристалле PMN-PT. Ось легкого намагничивания EA ориентирована под углом 45° к кристаллографической оси <100> PMN-PT.

ность. На верхнюю поверхность кристалла методом катодного распыления в магнитном поле [4, 5] нанесена наноструктурированная магнитоотрицательная пленка 20\*(TbCo<sub>25</sub> nm/FeCo<sub>5</sub> nm), играющая, помимо роли сенсора, роль верхнего электрода. Выбором направления магнитного поля в процессе напыления в пленке индуцирована одноосная магнитная анизотропия с легкой осью, ориентированной под углом 45° к кристаллографической оси <100> PMN-PT. Структура помещалась в магнитное поле  $\vec{H}$ , перпендикулярное оси легкого намагничивания (EA), как показано на схематическом рис. 1. Геометрия структуры аналогична использовавшейся ранее для демонстрации магнитоэлектрической записи информации импульсным электрическим полем [3, 4].

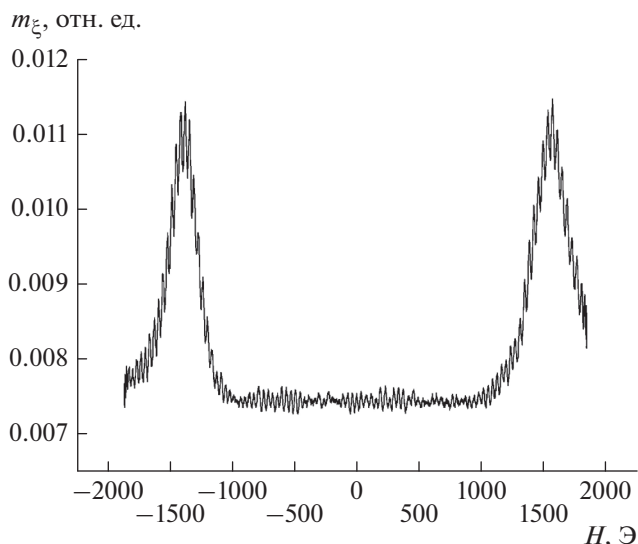
Плотность энергии магнитной подсистемы как функция угла ориентации  $\varphi$  вектора намагниченности  $\vec{M}$  в данном случае имеет вид:

$$F_m = -MH \cos \varphi - \frac{1}{2} MH_A \sin^2 \varphi + \frac{1}{2} B(u_{xx} - u_{yy}) \sin 2\varphi, \quad (1)$$

где  $B$  – константа магнитоотрицательности,  $H_A$  – напряженность поля анизотропии,  $u_{ij}$  – тензор деформации, создаваемой в пленке пьезоподложкой при приложении электрического напряжения к электродам.

При намагничивании пленки магнитным полем  $H < H_A$  магнитная система становится бистабильной, что и используется для бинарной записи информации импульсами электрического поля, прикладываемого к подложке.

При напряженности намагничивающего поля, превосходящей напряженность поля анизотропии  $H > H_A$ , магнитная система переходит в состояние насыщения с намагниченностью, направленной вдоль вектора  $\vec{H}$ . Деформирование пленки сопровождается отклонением намагни-



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды магнитооптического сигнала от напряженности магнитного поля. Сигнал индуцирован переменным электрическим напряжением, приложенным к кристаллу PMN-PT.

ченности от направления поля. При этом между деформацией и нормированной проекцией намагниченности на легкую ось  $m_\xi = M_\xi/M$  имеет место определенная связь:

$$u_{xx} - u_{yy} = \frac{MH_A}{B} \frac{m_\xi (h - \sqrt{1 - m_\xi^2})}{(1 - 2m_\xi^2)}, \quad (2)$$

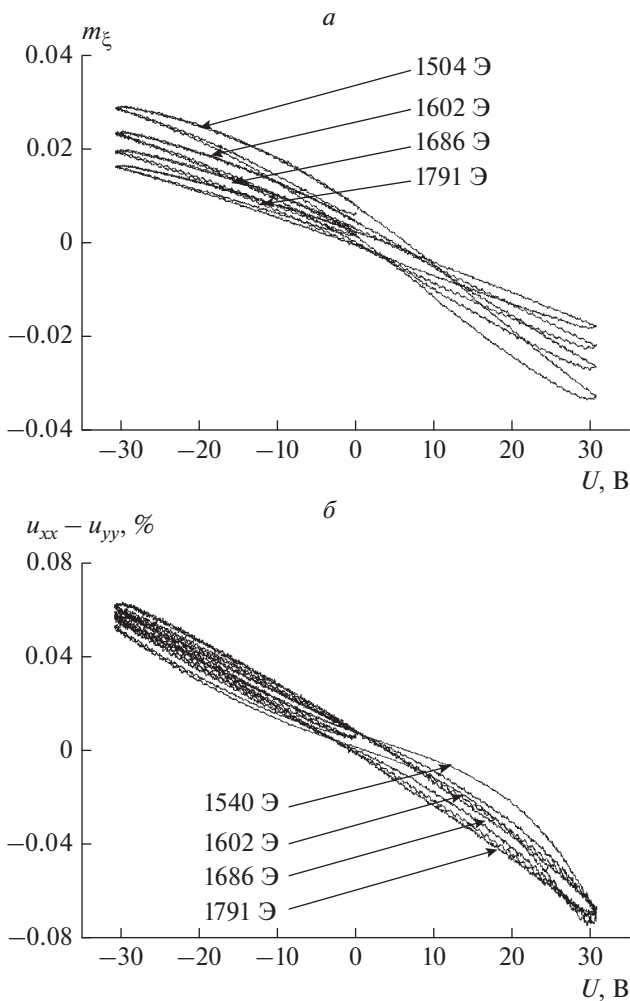
где  $h = H/H_A$ .

Проекция намагниченности может бесконтактно регистрироваться с помощью меридионального МОКЕ при распространении света в плоскости, параллельной легкой оси. Для использования соотношения (2) при расчете деформации сигнал МОКЕ должен нормироваться на магнитооптический сигнал, измеряемый при намагничивании пленки до насыщения вдоль оси анизотропии.

Вследствие малой толщины пленки по сравнению с толщиной кристалла, измеряемая таким образом анизотропная деформация не отличается от собственной пьезодеформации сегнетоэлектрика.

Чувствительность магнитооптического метода регистрации возрастает вблизи точки спиновой переориентации  $H \rightarrow H_A$ . Возрастание сигнала МОКЕ, генерируемого слабым переменным электрическим напряжением при  $H \rightarrow H_A = 1.4$  кЭ иллюстрирует рис. 2.

Результаты магнитооптических измерений зависимости проекции намагниченности  $m_\xi(U)$  на легкую ось от электрического напряжения  $U$ , приложенного к образцу приведены на рис. 3а. Чувствительность сигнала МОКЕ к электриче-



**Рис. 3.** *a* – Измеренная с помощью МОКЕ зависимость нормированной проекции магнитного момента на легкую ось ЕА от электрического напряжения при различных напряженностях поперечного намагничивающего поля; *б* – анизотропные пьезоэлектрические деформации, рассчитанные с помощью соотношения (2) по данным магнитооптических измерений (*a*).

скому полю растет по мере приближения намагничивающего поля к полю анизотропии. На рис. 3б показан результат пересчета зависимостей  $m_x(U)$  в зависимость анизотропных деформаций  $u_{xx} - u_{yy}$  от напряжения  $U$  с использованием известных параметров магнитной пленки:  $M = 800$  Гс и  $B = 10$  МПа.

Приведенные данные демонстрируют гистерезисное поведение анизотропного пьезоэффекта с коэрцитивной силой около 17 кВ/м при относительно слабых прикладываемых полях  $E_{max} = 0.1$  МВ/м. Полный интервал изменения деформации согласуется с данными работы [6], полученными на кристаллах PMN-PT <011> с помощью резистивных тензометрических датчиков. В то же время коэрцитивность исследуемого нами

образца в слабых полях оказалась значительно ниже. Частные циклы петель гистерезиса, приведенные на рис. 3б, соответствуют анизотропным пьезомодулям  $d_{31}-d_{32} = 6 \cdot 10^{-9}$  С/Н, что по порядку величины соответствует значению, полученному в работе [7] ультразвуковыми методами. Причиной наблюдаемых количественных различий может быть структурная чувствительность параметров кристалла и их существенная зависимость от конкретных условий преполяризации для отдельных образцов PMN-PT.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключение отметим, что технология напыления интерметаллических магнестрикционных наноструктур не предъявляет каких-либо специфических требований к материалам подложки. В связи с этим продемонстрированный в данной работе стрейнтронный магнитооптический метод исследования деформаций применим к широкому кругу пьезоэлектрических веществ. Современная литография позволяет наносить тензочувствительные магнитооптические пленки на топологически сложные структуры и элементы устройств. При этом пленки, используемые как элементы локального контроля деформаций, могут выполнять дополнительные функции металлических электродов. Наконец, область применимости магнитооптического метода исследования деформирования не ограничивается пьезоматериалами, а может использоваться в самых разных областях материаловедения. Так недавно независимо появилось сообщение [8] о применении МОКЕ для визуализации упругих напряжений в немагнитных металлах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 16-29-14022.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П., Фетисов Ю.К. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1288; Bukharaev A.A., Zvezdin A.K., Pyatakov A.P., Fetisov Yu.K. // Phys. Usp. 2018. V. 61. № 12. P. 1175.
2. Atulasimha J., Bandyopadhyay S. Nanomagnetic and spintronic devices for energy-efficient memory and computing. New Jersey: Wiley, 2016. 352 p.
3. Klimov A., Tiercelin N., Dusch Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. № 22. Art. № 222401.
4. Dusch Y., Tiercelin N., Klimov A. et al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. № 17. Art. № 17C719.
5. Klimov A., Tiercelin N., Preobrazhensky V., Pernod P. // IEEE Trans. Mag. 2006. V. 42. № 10. P. 3090.
6. Wu T., Zhao P., Bao M. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. Art. № 124101.
7. Wang F., Luo L., Zhou D. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. Art. № 212903.
8. Jourdan M., Krämer M.M.B., Kläui M. et al. // J. Magn. Magn. Mat. 2018. V. 465. P. 143.