

Природа гигантского линейного магнитоэлектрического эффекта в перовскитоподобном мультиферроике BiFeO_3

М.Д. Давыдова¹, К.А. Звездин^{1,2}, А.Ф. Попков^{1,3}, А.К. Звездин^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

³Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Был рассмотрен механизм возникновения линейного магнитоэлектрического эффекта в ромбоэдрическом перовскитоподобном мультиферроике феррите висмута (BiFeO_3). Была разработана теория линейного магнитоэлектрического эффекта, которая была основана на симметричном подходе типа Гинзбурга-Ландау с поляризацией \mathbf{P} , антиферродисторсией $\mathbf{\Omega}$ и антиферромагнитным моментом \mathbf{L} в качестве параметров порядка (см. рис 1).

В объемных кристаллах феррита висмута реализуется циклоидная спиновая структура, которая может быть переведена в однородную структуру при помощи внешнего магнитного поля, химического легирования или при приложении напряжения (например, в эпитаксиальных плёнках [1]). При наличии спиновой циклоиды намагниченность, коэффициенты линейного магнитоэлектрического эффекта и некоторые другие характеристики усредняются к нулю по периоду спиновой циклоиды. Однако для однородной фазы линейный магнитоэлектрический эффект восстанавливается, и его гигантское значение, равное $4.2 \text{ V}/(\text{cm Oe})$, было измерено в последних экспериментах с эпитаксиальными плёнками [2]. Из общего вида термодинамического потенциала системы было получено аналитическое выражение для тензора линейного магнитоэлектрического эффекта α_{ij} :

$$\alpha_{ji} = \frac{4\pi}{M_S} \Omega_0 \varepsilon_{inm} \frac{\delta \Omega_n}{\delta E_j} l_m,$$

где M_S – намагниченность насыщения, $\mathbf{\Omega}$ – вектор антиферродисторсии, Ω_0 – его равновесное значение, \mathbf{E} – приложенное внешнее электрическое поле, \mathbf{l} – единичный вектор антиферромагнитного момента. Таким образом, было показано, что возникновение линейного магнитоэлектрического эффекта обусловлено переориентацией вектора антиферродисторсии под действием внешнего электрического или магнитного полей. Далее, используя разложение сегнетоэлектрической части термодинамического потенциала по степеням параметров порядка [3] для однородной фазы был найден явный вид этого тензора в линейном приближении по компонентам единичного вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} :

$$\hat{\alpha} = 4\pi \frac{M_S}{\Omega_0} \begin{pmatrix} 0 & \eta_{\perp} l_z & -\eta_{\perp} l_y \\ -\eta_{\perp} l_z & 0 & \eta_{\perp} l_x \\ -\eta_{\parallel} l_y & \eta_{\parallel} l_x & 0 \end{pmatrix},$$

где η_i – значение электрической восприимчивости антиферродисторсии вдоль и поперёк кристаллографического направления [111]. Были проведены численные оценки линейного магнитоэлектрического эффекта в однородной фазе феррита висмута, которые составляют $0.7 - 9.8 \text{ V}/(\text{cm Oe})$. Проведённые численные оценки находятся в количественном согласии с результатами недавних измерений в тонкоплёночных образцах [2]. На основе предложенного объяснения было выдвинуто несколько механизмов дополнительного увеличения магнитоэлектрического эффекта (см., например, рис.2). Кроме того, предложенный подход является перспективным для объяснения возрастания магнитоэлектрического эффекта в композитных и гетероструктурах на основе феррита висмута.

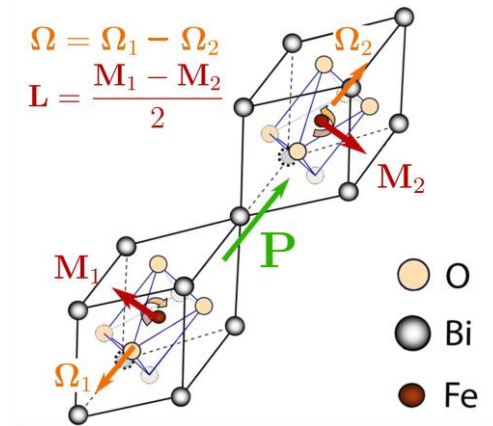


Рис.1 - Удвоенная перовскитная ячейка феррита висмута со схематическим обозначением параметров порядка.

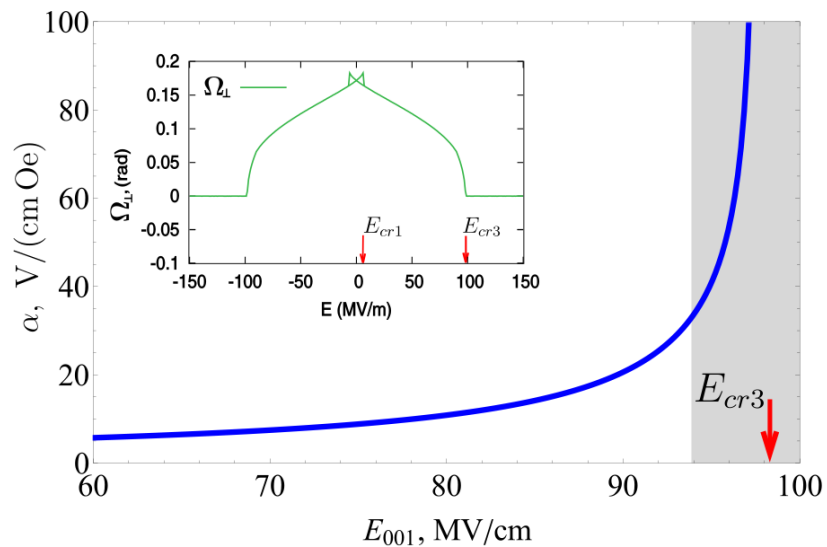


Рис.2 – Зависимость характерных значений линейного магнитоэлектрического коэффициента от значения приложенного электрического поля, параллельного оси [001]. Во вставке – фазовая диаграмма «антиферродисторсия – внешнее электрическое поле»

Литература

1. Bai F., Wang J., Wuttig M., Li J.F., Wang N., Pyatakov A., Zvezdin A.K., Cross L.E., Viehland D. Destruction of spin cycloid in (111)c-oriented BiFeO₃ thin films by epitaxial constraint: Enhanced polarization and release of latent magnetization // Appl. Phys. Lett. –2005 – V. 86. – P. 032511.
2. Lorenz M. et al. Correlation of magnetoelectric coupling in multiferroic BaTiO₃-BiFeO₃ superlattices with oxygen vacancies and antiphase octahedral rotations // Appl. Phys. Lett., 2015, V. 106, P. 012905
3. Kulagin N., Popkov A., Solovov S., Sukmanova K., Zvezdin A. Electric-field-induced structural and magnetic transformations in BiFeO₃ multiferroics // A. Phys. Solid State, 2015, V. 57, P. 933
4. Popkov A. F., Davydova M. D., Zvezdin K. A., Solov'yov S. V., Zvezdin A. K. Origin of the giant linear magnetoelectric effect in perovskitelike multiferroic BiFeO₃ // Phys. Rev. B, 2016, V. 93, P. 094435