

## Электроиндуцированный магнитомеханический эффект

М.А. Колюшенко<sup>\*</sup>, А.С. Каминский<sup>†</sup>, А.П. Пятаков<sup>‡</sup>

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет,  
кафедра физики колебаний. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 26.05.2023; подписана в печать 02.11.2023)

Развитие нанотехнологий привело к появлению наноэлектромеханических устройств, в которых механические перемещения вызываются и детектируются электрическим способом. Для многих антиферромагнетиков характерен магнитоэлектрический эффект, поэтому представляется интересным исследовать, насколько выражены магнитомеханические эффекты в магнитоэлектрических пленках, микро и нано-частицах. В данной работе исследуется возможность существования электроиндуцированного магнитомеханического эффекта в антиферромагнетиках, производится его оценка для образцов различной геометрии, а также рассматриваются методы регистрации и усиления эффекта, в том числе детектирование резонансного эффекта с использованием зондового микроскопа.

PACS: 75.50.Ee, 75.80.+q

УДК: 537.622.5, 537.634

Ключевые слова: антиферромагнетизм, магнитоэлектрический эффект, магнитомеханический эффект.

### ВВЕДЕНИЕ

Широко известен гиромангнитный эффект, исследованный ещё Эйнштейном и де Гаазом в начале 20 века. Проведённый ими классический опыт по определению гиромангнитного отношения основан на законе сохранения момента количества движения: ферромагнитный образец помещается во внешнее магнитное поле, при этом магнитные и связанные с ними механические моменты атомов упорядочиваются, создавая дополнительный момент импульса всего образца, что приводит к закручиванию его вокруг оси, параллельной направлению внешнего магнитного поля [1]. В текущем столетии к идее опыта Эйнштейна–де Гааза возвращались на микроскопическом уровне [2] (в пленке пермаллоя, осажённой на микроантилевер) и на субпикосекундных временных масштабах [3] (в качестве размагничивающего воздействия выступали импульсы фемтосекундного лазера). Однако данный эффект наблюдается только в ферромагнитных материалах, в связи с чем возникает вопрос: можно ли наблюдать гиромангнитный эффект при другом типе упорядочения — антиферромагнитном?

Поскольку магнитная восприимчивость антиферромагнетиков чрезвычайно мала ( $\sim 10^{-5}$ ), то получить сравнимый по величине, аналогичный классическому гиромангнитному, эффект в антиферромагнетиках можно только в мегагаусных полях. В этой связи более перспективным представляется воздействие не магнитным, а электрическим полем, поскольку ряд антиферромагнетиков являются магнитоэлектрическими веществами. Приложение электрического поля в силу обратного магнитоэлектрического эффекта приводит к появлению намагниченности и момента количе-

ства движения, т.е. электроиндуцированному магнитомеханическому эффекту. Описанный подход имеет дополнительное достоинство, связанное с миниатюризацией: на малых масштабах создать сильное электрическое поле значительно проще, чем сильное магнитное, что, при достаточно большом коэффициенте МЭ эффекта, позволит получить сравнимые с гиромангнитным эффектом значения момента количества движения. При этом устройства, использующие электрическое поле, будут заметно компактнее.

Особенно актуально это в связи с появлением двумерных магнитных материалов, представляющих собой предельных случаев тонких ферро- или антиферромагнитных пленок [4, 5], для которых возникает потребность в альтернативных по отношению к магнитно-резонансным методам исследования ферромагнетизма. Недавно появилось сообщение о косвенном проявлении эффекта Эйнштейна–де Гааза в двумерных магнитных материалах в виде сдвиговых колебаний, возникающих под действием размагничивающих фемтосекундных импульсов в ван-дер-ваальсовом антиферромагнетике [6].

Учитывая, что ряд антиферромагнетиков демонстрируют магнитоэлектрические свойства (включая 2D материалы, например  $CrI_3$ ) [7], исследуем, насколько выражены в таких магнитоэлектрических пленках, микро и нано-частицах магнитомеханические эффекты.

### 1. МЭ ЭФФЕКТ В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Антиферромагнетик — это вещество, в котором магнитные моменты соседних атомов или ионов ориентированы антипараллельно, причём магнитные моменты противоположно направленных подрешёток одинаковы по величине и, следовательно, намагниченность тела в целом равна нулю.

В антиферромагнетиках, обменная магнитная структура которых соответствует антисимметричному рас-

\* [koliushenkov.ma19@physics.msu.ru](mailto:koliushenkov.ma19@physics.msu.ru)

† [kaminskii.as14@physics.msu.ru](mailto:kaminskii.as14@physics.msu.ru)

‡ [pyatakov@physics.msu.ru](mailto:pyatakov@physics.msu.ru)

положению магнитных подрешеток [8], в результате приложения внешнего электрического поля ( $E$ ) за счёт обратного магнитоэлектрического эффекта происходит раскомпенсация связанных с атомами магнитных моментов (рис. 1).



Рис. 1. Изменение структуры антиферромагнетика при приложении электрического поля

Таким образом, у образца появляется ненулевая намагниченность, пропорциональная электрическому полю — обратный МЭ эффект.

Обратный МЭ эффект можно выразить следующей формулой:

$$M_j = \alpha_{ij} E_i, \quad (1)$$

где  $\alpha_{ij}$  — тензор магнитоэлектрического эффекта, компоненты которого пропорциональны линейным комбинациям компонент вектора антиферромагнетизма.

Впервые МЭ эффект в антиферромагнетиках был обоснован Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем, а наблюдался экспериментально Д. Н. Астровым в образце  $Cr_2O_3$  [9]. Общий вид тензора  $\alpha_{ij}$  для  $Cr_2O_3$  можно найти в работе [10], однако в отсутствие сильных магнитных полей ( $\sim 8$  Тесла) отличен от нуля только продольный магнитоэлектрический эффект  $\mu_0 dM/dE = 4.1$  пс/м [11]. В настоящее время имеются данные о гигантском МЭ эффекте в  $Ba_{0.52}Sr_{2.48}Co_2Fe_{24}O_{41}$ , где коэффициент  $\alpha$  на 3 порядка больше чем в  $Cr_2O_3$  [12].

## 2. МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ

При приложении электрического поля вместе с раскомпенсацией магнитных моментов (рис. 1) происходит раскомпенсация и связанных с ними моментов импульса атомов, в результате чего образец, как и в опыте Эйнштейна-де Гааза приходит во вращательное движение.

Оценим наблюдаемый эффект вращения образца. Как уже было сказано, в основе рассматриваемого явления лежит обратный магнитоэлектрический эффект в антиферромагнетиках, в результате которого, в соответствии с (1) при приложении разности потенциалов  $U$  у образца появится намагниченность:

$$M = \alpha E = \alpha \frac{U}{2r}.$$

При этом частица приобретает дополнительный момент импульса:

$$L = \frac{1}{\gamma} m = \frac{1}{\gamma} MV, \quad (2)$$

где  $\gamma = \frac{e}{m\hbar}$  — гиромагнитное отношение для электрона,  $m = MV$  — приобретенный магнитный момент.

С другой стороны, момент импульса можно выразить через частоту вращения и момент инерции образца:

$$L = J\omega. \quad (3)$$

Сопоставляя (2) и (3), приходим к выражению для угловой скорости свободно вращающейся частицы:

$$\omega = \frac{MV}{\gamma J}. \quad (4)$$

Однако в реальных системах необходимо учитывать силы сопротивления, возникающие при вращении образца. Оценим влияние силы вязкого трения на вращение.

Динамическое уравнение вращательного движения имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = M_{тр}. \quad (5)$$

В общем случае момент силы вязкого трения можно представить в виде:

$$M_{тр} = -\omega h. \quad (6)$$

где  $h$  — обобщенный коэффициент вязкого трения, зависящий от геометрии частицы и типа окружающей среды, который в общем виде можно представить как  $h = \beta\eta V$ , где  $\beta$  — формфактор,  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости воздуха,  $V$  — объем образца.

В частности, для рассматриваемых геометрий образцов (рис. 2).

- Для сферической частицы:  $h = 6\pi\eta R^3$  [13],
- Для цилиндрической частицы:  $h = 4\pi\eta R^2 L$  [14], где  $L$  и  $R$  — геометрические параметры образца.
- Для консоли, помимо вклада, пропорционального объему, содержится также вклад от боковой поверхности определяемый произведением объема на отношение  $\frac{r}{d}$ , где  $r$  — длина, а  $d$  — ширина консоли, т.е.  $\beta = \beta\left(\frac{r}{d}\right)$ .

Тогда из выражений (5) и (6) получим:

$$\frac{d\omega}{\omega} = -\frac{h}{J} dt, \quad \omega = \omega_0 e^{-2\delta t}, \quad (7)$$

где  $\delta = \frac{h}{2J}$  — коэффициент затухания.

Для наблюдения эффекта вращения необходимо, чтобы  $\omega$  превышало  $2\delta$ , из (4) и (7) получим:

$$\frac{MV}{\gamma} > h, \quad \frac{M}{\gamma} > \beta\eta, \quad (8)$$

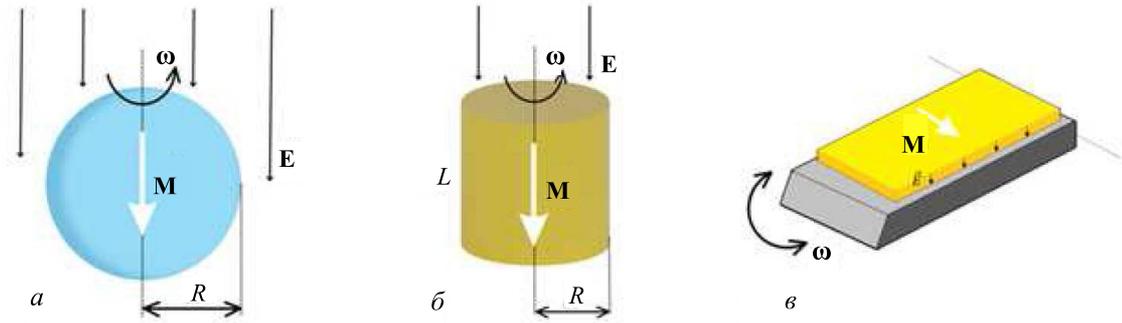


Рис. 2. Три рассматриваемых геометрии магнитоэлектрического образца: *a* — сферическая микро- или наночастица, *б* — микро- или нанотрубка, *в* — пленка на упругой консоли

В качестве оценки электроиндуцированной намагниченности возьмем величину  $10^4$  А/м, что соответствует магнитоэлектрическому эффекту в оксиде хрома при поле, близком к полю пробоя  $\sim 10^7$  В/см (в двумерных материалах напряженности поля 1 В/нм ( $10^7$  В/см)) являются рабочими [7]), или электроиндуцированной намагниченности  $mu_B$  на элементарную ячейку в гексаферрите  $Ba_{0.52}Sr_{2.48}Co_2Fe_{24}O_{41}$  под действием поля 10 кВ/см [12]. Коэффициент динамической вязкости воздуха (при  $t = 293$  К и атмосферном давлении):  $\eta = 18 \times 10^{-6}$  Па·с, гиромагнитное отношение  $\gamma = 1.76 \times 10^{11}$  Кл/кг,  $\beta = 4$  (для цилиндрического образца).

Подставляя эти величины в формулу (8), приходим к выводу, что левая часть неравенства (8) в нормальных условиях на три порядка меньше правой, поэтому главным вызовом для экспериментатора является понижение потерь в системе или увеличение величины магнитоэлектрического эффекта.

### 3. РЕЗОНАНСНЫЙ ЭФФЕКТ

В классическом опыте Эйнштейна–де Гааза для преодоления трудностей, связанных с малостью эффекта, авторы использовали не вращение, а крутильные колебания ферромагнитного бруска, подвешенного на упругой нити, при приближении частоты внешнего переменного поля к собственной частоте колебательной системы наблюдалось явление резонанса, и амплитуда колебаний резко возрастала.

Из систем, рассматриваемых в рамках данной работы, колебательной является система, образованная антиферромагнитной плёнкой, нанесенной на упругую консоль. В качестве этой упругой консоли можно использовать кантилевер зондового микроскопа, собственная частота которого обычно имеет величину порядка  $10^4$  Гц, при приближении частоты колебаний внешнего переменного электрического поля к собственной частоте кантилевера возможен резонанс и заметное усиление колебаний.

Запишем уравнение колебаний рассматриваемой системы в общем виде:

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = \frac{M}{J} \cos(pt), \quad (9)$$

где  $\phi$  — угол отклонения от положения равновесия,  $\omega_0$  — собственная частота кантилевера,  $p$  — частота колебаний электрического поля.

Решая уравнение (9), в случае резонанса, при  $p = \omega_0$  получим:

$$\phi = \frac{1}{\gamma} \frac{MV}{2\delta J} \sin(\omega_0 t) = \frac{M}{\gamma\beta\eta} \sin(\omega_0 t). \quad (10)$$

Следовательно, амплитуда в резонансе:

$$\phi_{max} = \frac{M}{\gamma\beta\eta}.$$

Подставляя в полученное выражение характерные для нашей системы величины получим, что максимальный угол отклонения  $\phi_{max} \sim 10^{-3}$ .

Учитывая, что диапазон чувствительности зондового микроскопа достигает значений  $\sim 10^{-5}$  и менее, можно сделать вывод о том, что данный эффект достаточно легко зарегистрировать с использованием зондового микроскопа.

### 4. ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТА

Несмотря на то, что, как показано выше, исследуемый электроиндуцированный магнитомеханический эффект теоретически наблюдаем, он все равно имеет достаточно малую величину, при этом далеко не каждая исследуемая система является колебательной, а значит подход, описанный в предыдущем разделе, к ним не применим. Поэтому вопрос усиления рассматриваемого эффекта остается достаточно важным.

Для увеличения желаемого эффекта можно предложить несколько возможных вариантов:

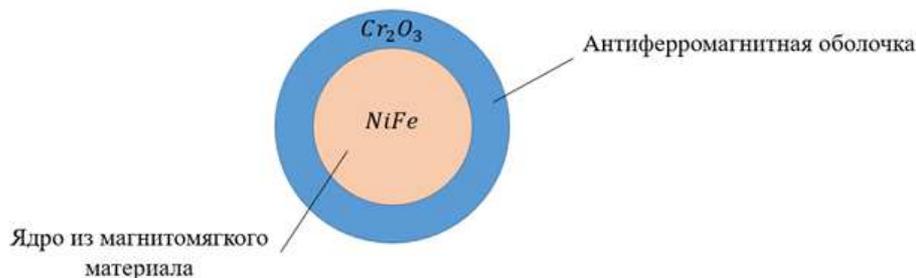


Рис. 3. Возможная структура композитной частицы

- Создание вакуума: понижение коэффициента динамической вязкости воздуха хотя бы на 2 порядка позволит преодолеть сложности, связанные с наличием силы вязкого трения в среде.
- Создание обменно-связанных композитных структур из магнитомягкого ферромагнитного материала и магнитоэлектрика (рис. 3), в которых вызванное электрическим полем переключение антиферромагнитного параметра порядка приводит к большим изменениям намагниченности ферромагнитного слоя [15]. Таким образом можно нарастить величину электроиндуцированной намагниченности до величин, сравнимых с теми, что характеризовали классический опыт Эйнштейна–де Гааза.
- В колебательных системах для увеличения измеряемой величины можно предложить измерять не амплитуду, а скорость колебаний в резонансе, в этом случае измеряемое значение, в соответствии с (10), будет ещё на несколько порядков выше, так как для амплитуды скорости  $\Omega_{max} = \phi_{max}\omega_0$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в данной работе электроиндуцированный магнитомеханический эффект может найти применение как в научных исследованиях свойств наноматериалов, так и в некоторых практических приложениях. Несмотря на малость эффекта, в работе было теоретически продемонстрировано, что рассматриваемый эффект может наблюдаться в образцах, представляющих собой колебательные системы с резонансом. Используя зондовый микроскоп в качестве измерительной установки, можно зарегистрировать исследуемое явление с достаточно большим запасом чувствительности. Также были рассмотрены различные способы, повышающие надежность детектирования эффекта, включающие как понижение диссипации, так и увеличение сигнала за счет усиления эффекта.

А.П. Пятаков и А.С. Каминский выражают признательность за поддержку исследований Фонду развития теоретической физики «Базис» (программа Junior Leader).

- [1] Френкель В.Я. // УФН. **128**, № 3. 545. (1979).
- [2] Wallis T.M., Moreland J., Kabos P. // Appl. Phys. Lett. **89**, 122502 (2006).
- [3] Dornes C., Acremann Y., Savoini M. et al. // Nature. **565**. 209. (2019).
- [4] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, Klein DR et al. // Nature. **546**, N 7657. 270. (2017).
- [5] Gong C., Li L., Li Z., Ji H. et al. // Nature. **546**. 265. (2017).
- [6] Zong A., Zhang Q., Zhou F. et al. // Nature. **620**. 988. (2023).
- [7] Jiang S., Shan J., Mak K.F. // Nat. Mater. **17**. 406. (2018).
- [8] Туров Е.А. // УФН **164**. 325. (1994).
- [9] Астров Д.Н. // ЖЭТФ. **11**. № 3. 708. (1960).
- [10] Белов Д.В., Воробьев Г.П., Звездин А.К. и др. // Письма в ЖЭТФ. **58**, № 8. 603. (1993).
- [11] Eerenstein, W., Wiora, M., Prieto, J. et al. // Nature Mater. **6**. 348. (2007).
- [12] Chun S.H., Chai Y.S., Jeon B.-G., Kim H.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 108, 177201. (2012).
- [13] Дудин И.В., Нариманов Р.К., Нариманова Г.Н. // Eurasian Physical Technical Journal. **15**, N 2. (30). 40. (2018).
- [14] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая Физика. В 10 т. Т. **6**. Гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001–2005.
- [15] Borisov P. et al. // Phase Transitions. **79**, N 12. 1123. (2006).

## Electro-induced magnetomechanical effect

**М.А. Koliushenkov<sup>a</sup>, A.S. Kaminskiy<sup>b</sup>, A.P. Pyatakov<sup>c</sup>**

*Department of physics of oscillations, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*  
*E-mail: <sup>a</sup>koliushenkov.ma19@physics.msu.ru, <sup>b</sup>kaminskii.as14@physics.msu.ru, <sup>c</sup>pyatakov@physics.msu.ru*

The development of nanotechnologies give rise to the nanoelectromechanical devices, in which mechanical movements are induced and detected electrically. Many antiferromagnetics are characterized by a magnetoelectric effect, so it seems interesting to investigate how pronounced magnetomechanical effects are in magnetoelectric films, micro and nano-particles. In this paper, the possibility of the existence of an electrically induced magnetomechanical effect in antiferromagnetics is investigated, its evaluation for samples of different geometries is made, and methods for recording and enhancing the effect, including the detection of the resonance effect using a probe microscope, are discussed.

PACS: 75.50.Ee, 75.80.+q.

*Keywords:* antiferromagnetism, magnetoelectric effect, magnetomechanical effect.

*Received 26 May 2023.*

### Сведения об авторах

1. Колюшенко Максим Андреевич — студент; e-mail: [koliushenkov.ma19@physics.msu.ru](mailto:koliushenkov.ma19@physics.msu.ru).
2. Каминский Алексей Сергеевич — аспирант; тел.: (495) 939-41-38, e-mail: [kaminskii.as14@physics.msu.ru](mailto:kaminskii.as14@physics.msu.ru).
3. Пятаков Александр Павлович — доктор физ.-мат. наук, профессор РАН; тел.: (495) 939-41-38, e-mail: [pyatakov@physics.msu.ru](mailto:pyatakov@physics.msu.ru).