

УДК 538.6

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ME_E -ЭФФЕКТА АСТРОВА НА БАЗЕ ВИБРАЦИОННОГО МАГНИТОМЕТРА

© 2014 г. А. Д. Балаев, А. Л. Фрейдман

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Академгородок, Россия

Поступила в редакцию 04.06.2013 г.

Собрана установка для измерения ME_E -эффекта путем фиксации (измерения) амплитуды колебания намагниченности образца в ходе его реполяризации, вызванной приложением переменного напряжения к обкладкам образца. На монокристаллическом образце $Ga_{2-x}Fe_xO_3$ проведены измерения температурной зависимости ME_E -эффекта при различных значениях внешнего магнитного поля H от 0.25 до 1 кЭ в диапазоне температур от 77.4 до 280 К. Обнаружено, что эффект пропадает при достижении температуры Кюри. Измерен гистерезис магнитоэлектрического эффекта, связанный с гистерезисом намагниченности.

DOI: 10.7868/S0207352814010077

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы уделяется много внимания материалам, проявляющим мультиферроизм, особенно тонким пленкам $BiFeO_3$, что обусловлено их перспективностью с точки зрения приложений [1–3]. Основная доля методик исследования магнитоэлектрического поведения мультиферроиков основана на ME_H -эффекте [4], на эффекте изменения поляризации ΔP при изменении внешнего магнитного поля H и/или температуры T , $\Delta P(T, H)$ [5–7]. Ввиду того что в магнитоэлектриках поляризация и намагниченность образца связаны между собой, можно проводить измерения не только изменения поляризации как функции внешнего магнитного поля $\Delta P(H)$, но также изменения намагниченности как функции электрического поля $\Delta M(E)$, ME_E -эффекта [4]. Однако данный подход к измерениям освещен в литературе недостаточно, несмотря на простоту подобных измерений, позволяющую отказаться от импульсных методик, что упрощает интерпретацию данных и увеличивает точность эксперимента.

В работе Д.Н. Астрова [8] была предложена методика измерения ME_E -эффекта, который заключается в изменении намагниченности при приложении электрического поля $\Delta M = aE$, где a – тензор линейного магнитоэлектрического эффекта. В работе [9] была описана реализация метода Астрова на базе SQUID-магнитометра. В данной работе было показано, что подобные измерения можно также реализовать на базе вибрационного магнитометра. Этот подход имеет преимущество в том, что возможно измерение в двух режимах. Магнитометр позволяет измерять общую намагниченность образца, которая обусловлена двумя

составляющими $M(H, E) = M(H) + M(E)$. Первый член соответствует намагниченности кристалла, вызванной приложением магнитного поля H , второй член соответствует ME_E -эффекту. Сравнивая намагниченность без приложения и с приложением электрического поля E , можно выделить составляющую магнитоэлектрического эффекта $M(E) = M(H, E) - M(H, 0)$. Также возможно проведение измерений по методу Астрова.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ME_E -ЭФФЕКТА

В лаборатории сильных магнитных полей ИФ СО РАН собрана установка на базе созданного в 1985 г. вибрационного магнитометра, описанного в [10]. Установка предназначена для измерения ME_E -эффекта, который заключается в изменении магнитного момента образца ΔM вследствие изменения внешнего электрического поля E .

Как известно, при измерении магнитного момента в вибрационном магнитометре с соленоидом образец колеблется в центре сбалансированной системы аксиальных съемных катушек. При перемещении образца из центра вибрации в центр одной из съемных катушек возможно измерение ЭДС, наводимой изменением магнитного момента ΔM образца, возникающего за счет магнитоэлектрического эффекта в отсутствие вибрации. Таким образом, фактически реализуются измерения по методу [8].

Принципиальная схема установки показана на рис. 1. Образец 1 с нанесенными обкладками 2 включен в сеть с генератором переменного напряжения 3. При включении генератора образец непрерывно реполяризуется. Ввиду того что в магнитоэлектриках поляризация связана с намагниченностью, изменение поляризации образца

¹ E-mail: smp@iph.krasn.ru.

ΔP приводит к изменению его магнитного момента ΔM . Образец располагается в центре одной из съемных катушек 4, в которой ввиду перемагничивания образца индуцируется переменное напряжение U , которое и используется в качестве снимаемого сигнала. Соленоид 5 предназначен для создания внешнего постоянного магнитного поля H . Образец представляет собой плоский конденсатор, напряженность электрического поля будет тем больше, чем меньше зазор между обкладками, а следовательно измерения на тонких образцах (пленках) будут наиболее чувствительными.

На рис. 2 схематически изображена временная зависимость поведения магнитного момента образца при подаче переменного напряжения на его обкладки. В процессе измерений магнитный момент образца осциллирует относительно постоянного значения M_0 , обусловленного присутствием постоянного магнитного поля H с частотой, равной частоте сигнала, подаваемого с генератора 3. Переменное электрическое напряжение U , подаваемое на обкладки образца, приводит к его переполяризации, переполяризация ввиду магнитоэлектрической связи приводит к изменению его магнитного момента. Таким образом, в съемной катушке 4 (рис. 1) индуцируется переменное напряжение, которое обусловлено периодическим изменением намагниченности образца. Измеряя величину индуцированного переменного напряжения, можно определить амплитуду перемагничивания образца ΔM , а изменяя внешние условия, с помощью данного метода можно снимать полевые, температурные и иные зависимости.

Так как метод основан на измерении ЭДС, индуцированной в съемной катушке 4, увеличение частоты сигнала, подаваемого с генератора 3, приводит к пропорциональному увеличению снимаемого сигнала, что улучшает отношение сигнал/шум, но ухудшает условие квазистационарности переполяризации.

Величина выходного сигнала относительно мала, поэтому использовалось синхронное детектирование сигнала с катушки 4 по опорному сигналу генератора 3 с частотой переполяризации. Таким образом, производилась перенастройка приборов магнитометра [10] на частоту переполяризации.

ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Были проведены тестовые измерения на известном магнитоэлектрике $Ga_{2-x}Fe_xO_3$ с $x = 1.3$ [4, 11, 12], с орторомбической симметрией ($E \parallel b, H \parallel c, \Delta M$ фиксировалось вдоль c оси). На рис. 3 изображен график температурной зависимости магнитоэлектрического эффекта $\Delta M(T)$, где ΔM – амплитуда изменения намагниченности образца, вызванного его переполяризацией. Ам-

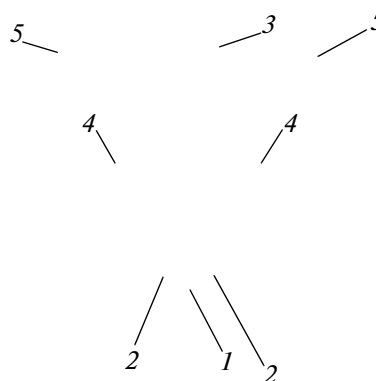


Рис. 1. Схема измерения $\Delta M(T)$, $\Delta M(U)$, $\Delta M(H)$.

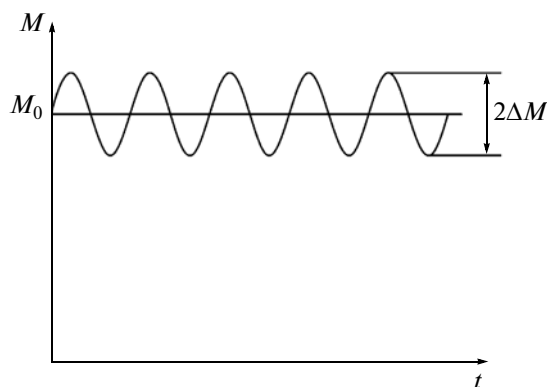


Рис. 2. Поведение намагниченности образца в процессе измерений.

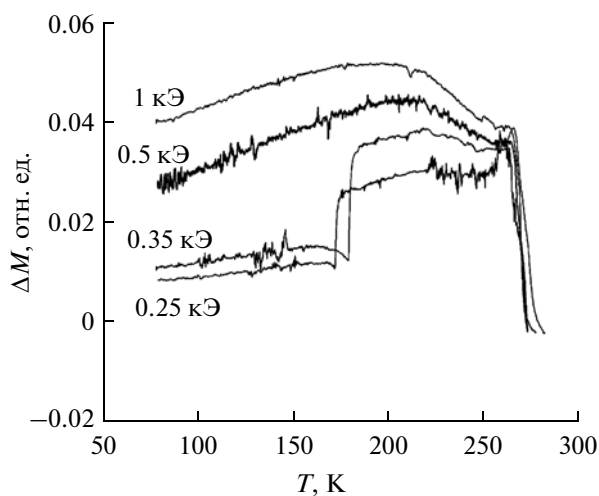


Рис. 3. График зависимости магнитоэлектрического эффекта ΔM как функции температуры (T) при различных значениях магнитного поля.

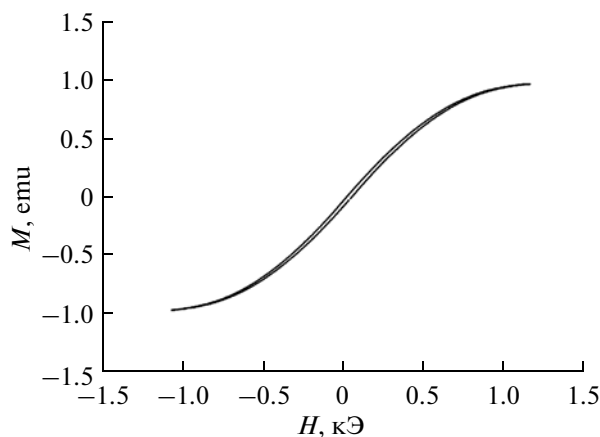


Рис. 4. График зависимости намагниченности образца M от приложенного магнитного поля H при $T = 77.4$ К.

плитуда изменения намагниченности образца в приведенных ниже графиках дана в относительных единицах, для получения абсолютных величин требуется калибровка установки. Данные зависимостей $\Delta M(T, H)$ регистрировались в автоматическом режиме на ЭВМ, как и в [10].

Кривые на рис. 3 были сняты в различных внешних магнитных полях H от 0.25 до 1 кЭ при одинаковом напряжении на обкладках $U = 100$ В и частоте $n = 1400$ Гц. Общий вид кривых качественно совпадает с данными [4]. Как видно из графика, в слабых магнитных полях при достижении некоторой температуры происходит резкий скачок амплитуды магнитоэлектрического эффекта, что, возможно, связано с быстрым смещением границ доменов зарядового упорядочения при достижении данных температур. Также это может быть связано с тем, что коэрцитивная сила при данных температурах падает до значения, при котором перемагничивание образца происходит более эффективно. Как видно из рис. 4, поля, при которых наблюдается скачок, соответствуют тем значениям, при которых петля гистерезиса еще не схлопнулась. Также видно, что при достижении температуры Кюри $T_C = 272$ К магнитоэлектрический эффект пропадает. А непосредственно до температуры Кюри возникает пик, который, видимо, связан с эффектом Гопкинсона. Чем меньше величина внешнего магнитного поля, тем более четко выражен пик.

Также была снята полевая зависимость магнитоэлектрического эффекта $\Delta M(H)$, представленная на рис. 5. Гистерезис поведения магнитоэлектрического эффекта, видимо, связан с гистерезисом намагниченности M образца (рис. 4). Из сравнения рис. 4 и 5 можно сделать вывод, что величина магнитоэлектрического эффекта пропорциональна намагниченности образца, по крайней

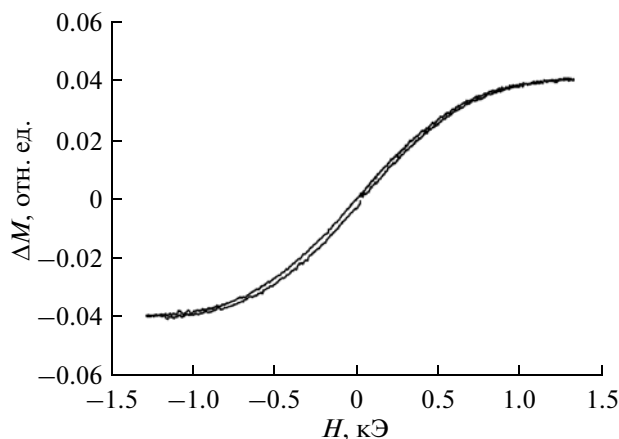


Рис. 5. График зависимости магнитоэлектрического эффекта M как функции внешнего магнитного поля H при $T = 77.4$ К.

мере, в диапазоне значений магнитного поля, в котором были проведены измерения.

ВЫВОДЫ

Собрана установка по измерению ME_E -эффекта в квазистационарном режиме. В измерениях фиксируется амплитуда колебания намагниченности образца при его переполяризации, вызванной приложением переменного напряжения к обкладкам образца. Для апробации методики был выбран монокристаллический образец $Ga_{2-x}Fe_xO_3$. На данном образце измерена температурная зависимость магнитоэлектрического эффекта при различных внешних магнитных полях H от 0.25 до 1 кЭ в диапазоне температур от 77.4 до 280 К. Обнаружено, что эффект пропадает при достижении температуры Кюри, что свидетельствует о правильности используемого метода. Также были сняты полевые зависимости $\Delta M(H)$, представляющие собой гистерезис, связанный гистерезисом намагниченности. В целом данная установка оказалась достаточно чувствительной для измерения ME_E -эффекта и позволяет зафиксировать многие параметры этого явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eerenstein W., Mathur N.D., Scott J.F. // Nature. 2006. V. 442/17. P. 759.
2. Nan C.W., Bichurin M.I., Dong S. et al. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031101.
3. Ramesh R., Spaldin N.A. // Nature Mater. 2007. V. 6. P. 21.
4. Rado G.T. // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. № 10. P. 335.
5. Zapf V.S., Kenzelmann M., Wolff-Fabris F. et al. // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 060402(R).
6. Cheong S.W., Mostovoy M. // Nature Mater. 2007. V. 6. P. 13.
7. Fiebig M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 123.

8. Астров Д.Н. // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 984.
9. Kita E. // Ferroelectrics. 1994. V. 162. P. 397.
10. Балаев А.Д., Бояришинов Ю.В., Карпенко М.М., Хрусталева Б.П. // ПТЭ. 1985. Т. 3. С. 167.
11. Naik V.B., Mahendiran R. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. 123910.
12. Roy A., Prasad R., Auluck S., Garg A. // J. Appl. Phys. 2010. V. 111. 043915.

Realisation of Measurement of Astrov ME_E Effect on the Base of Vibrating-Coil Magnetometer

A. D. Balaev, A. L. Freydmann

The installation to measure reversal magnetoelectric effect was assembled. To test of work correctness the ME_E -effect on single crystal $Ga_{2-x}Fe_xO_3$ was measured at different magnetic field from 0.25 kOe up to 1 kOe in temperature range from 77.4 K up to 280 K. It is detected that the ME_E -effect disappears at Curie temperature that confirms the measurement correctness. By this method the hysteresis behavior of ME_E -effect associated with magnetization hysteresis was demonstrated.