

О КВАДРУПОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО Cr_2O_3

Д.Н.Астров, Н.Б.Ермаков

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений*

141570 Менделеево, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 24 января 1994 г.

Экспериментально подтверждено предсказание теории [1] о существовании собственного квадрупольного магнитного поля у магнитоэлектрического кристалла.

Всегда молчаливо предполагалось, что антиферромагнитный кристалл, не имеющий дипольного магнитного момента, не может иметь и собственного внешнего магнитного поля. Дзялошинский, однако, отметил [1], что такой кристалл может обладать собственным магнитным полем более высокого порядка, чем поле диполя, которое должно зависеть от расстояния по степенному закону. Порядок возникающего магнитного мультиполя тесно связан с магнитной симметрией кристалла. В этой работе Дзялошинский, в частности, показал, что требование к симметрии кристалла для существования квадрупольного магнитного момента оказывается точно таким же, что и для существования магнитоэлектрического эффекта. В обоих случаях как магнитная симметрия магнитоэлектрического кристалла [2], так и квадрупольный магнитный момент инвариантны при одновременном воздействии инверсии и изменении знака времени.

Мы провели эксперимент для обнаружения квадрупольного поля магнитоэлектрического Cr_2O_3 [3], для которого в работе [1] даны формулы, описывающие составляющие его внешнего поля по тригональной оси кристалла H_z и в его базисной плоскости H_{\perp} , позволяющие детально сравнить результаты опыта с предсказанием теории.

Измерить непосредственно величины H_z и H_{\perp} очень сложно, но не трудно вычислить и сравнить с экспериментом радиальную составляющую искомого квадрупольного поля H_R и его тангенциальную составляющую H_t , направленную по касательной к поверхности сферического кристалла.

Пользуясь формулами Дзялошинского и отсчитывая угол θ от оси кристалла, можно получить удобно измеряемые в опыте величины:

$$H_R = H_{\perp} \sin \theta + H_z \cos \theta = 3 \cdot 10^{-5} \frac{V}{R^4} (3, 3 + \cos 2\theta), \quad [\text{Гс}]$$

$$H_t = H_{\perp} \cos \theta - H_z \sin \theta = 1, 35 \cdot 10^{-4} \frac{V}{R^4} \sin 2\theta, \quad [\text{Гс}] \quad (1)$$

где R – расстояние от центра кристалла до точки наблюдения в см, а V – объем образца в см^3 .

Схема опыта показана на рис.1. Монокристаллический образец $\text{Cr}_2\text{O}_3(1)$, использовавшийся нами ранее [3], имел форму сферы диаметром 6,4 мм. Отклонение от сферичности составляло 0,2 мм. Образец поворачивался на 360° вокруг оси (2), лежавшей в его базисной плоскости и проходящей через центр

H_t, H_R , усл. ед.

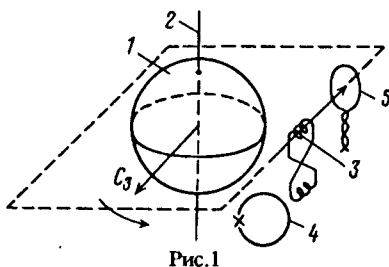


Рис.1

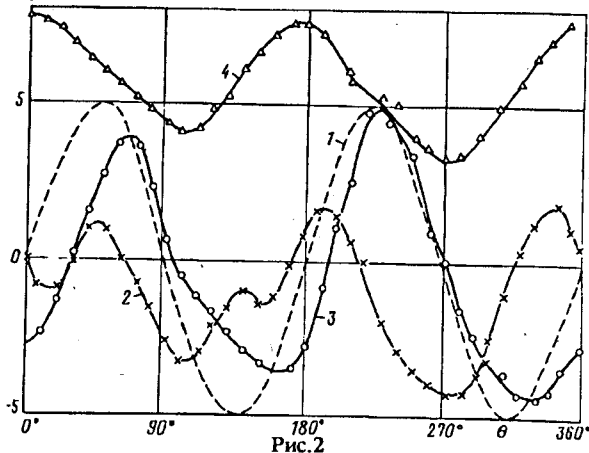


Рис.2

Рис.1. Схема эксперимента. Пояснения в тексте

Рис.2. Результаты измерения тангенциальной составляющей магнитного поля H_t на различном расстоянии от кристалла (x и o) и радиальной составляющей H_R — (Δ). Пояснения в тексте

образца. Погрешность центровки образца в приспособлении для его вращения приводило к биениям, доходившим до 0,5 мм. На небольшом расстоянии от кристалла была расположена неподвижная приемная катушка (3), имевшая 10 витков на диаметре 3,5 мм при длине катушки 2 мм. Эта катушка была частью сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, который регистрировался ВЧ СКВИД, ом (4). Приемная катушка была ориентирована или для измерения тангенциальной составляющей внешнего поля кристалла, H_t , как показано на рис.1, или для измерения его радиальной составляющей H_R . Ее ось лежала в плоскости, перпендикулярной к оси вращения и проходящей через центр кристалла. Точность ориентации кристалла и катушки была $\sim 5^\circ$. Вблизи приемной катушки располагалась калибровочная катушка (5), создававшая известное магнитное поле. Изображенное устройство было окружено сверхпроводящим экраном. Перед помещением в прибор кристалл переводился в однодоменное состояние медленным охлаждением через точку антиферромагнитного перехода в постоянных электрическом и магнитном полях. Измерения выполнялись при температуре 4,2 К.

Результаты измерений в зависимости от угла поворота кристалла показаны на рис.2. Здесь кривая 1 описывает результат вычисления угловой зависимости тангенциальной составляющей магнитного поля по формулам (1). Экспериментальная кривая 2 получена при наименьшем возможном расстоянии между кристаллом и катушкой, составившем 0,64 см. Масштаб по вертикальной оси на рис.2 не сохранен. Кривая 3 представляет собой одну из трех типичных угловых зависимостей тангенциальной составляющей поля, измеренных при больших расстояниях R от центра кристалла, достигавшего 0,96 см. Измерения при расстояниях, превышавших 0,96 см, нами не проводились, поскольку при этом могли возникнуть искажения формы магнитного поля, связанные с близостью точки наблюдения к сверхпроводящему экрану.

Можно видеть, что угловая зависимость кривой 3 имеет период 180° , как и должно быть для квадрупольного магнитного поля, и мало отличается от ожидавшейся зависимости, полученной из теории. Это позволяет считать, что искажения, хорошо видные на кривой 2, возникающие при приближении точки наблюдения к образцу, не связаны с присутствием магнитных загрязнений или наличием двойников в кристалле, которые могли бы дать угловую зависимость с периодом 360° . Кроме того, сигнал от этих двух возможных источников дипольного магнитного поля должен убывать при увеличении расстояния как его квадрат, а не как четвертая степень для квадруполья, и соответственно, стал бы преобладающим на большом расстоянии.

Возможным источником искажения сигнала на малых расстояниях являются отклонение формы кристалла от сферической и недостаточно точная его центровка в приспособлении для вращения. Искажения этого происхождения должны дать плавную кривую с периодом 360° . Однако вид кривой 2 оказался значительно сложнее и позволяет предположить, что на малых расстояниях проявляется примесь мультипольного состояния более высокого порядка, чем квадруполь, поле которого найдено Дзялошинским для точки наблюдения, находящейся далеко от образца. Поле такого мультиполя должно затухать с расстоянием гораздо быстрее, чем $1/R^4$, что и наблюдается в опыте. При увеличении расстояния всего на 15% характерные извивы, наблюдаемые на кривой 2, в пределах воспроизводимости наших измерений не видны.

К сожалению, мы не можем в нашем устройстве исследовать детально поле вблизи образца. Для этого необходимо улучшить его сферичность, уменьшить в несколько раз биения и применить измерительную катушку гораздо меньших размеров. При изучении зависимости составляющей поля H_z от расстояния нужно было правильно выбрать точку внутри измерительной катушки, до которой это расстояние следовало измерять, поскольку поле с ростом R быстро убывает и на малых расстояниях от образца меняется более чем в 3 раза в пределах сечения катушки. Соответствующую поправку к величине R , измерявшейся с точностью 0,3 мм, мы оценивали посредством графического интегрирования.

Величина измерявшегося по максимальной разности сигнала в пиках угловых зависимостей соответствовала формуле $1/R^4$ в пределах 25%. Сама величина сигнала при различных расстояниях менялась в 4,8 раза. Однако при сравнении с вычисленной из теории величиной поля оказалось, что экспериментальные значения H_z в 3,8 раза меньше, чем ожидалось.

На том же рис.2 кривая 4 описывает угловую зависимость переменной части одной из типичных кривых для радиальной составляющей магнитного поля кристалла. Постоянную составляющую радиального поля, которая должна присутствовать согласно формулам (1), мы не могли измерить, и она на рис.2 изображена произвольной величины. Для этого случая угловая зависимость очень хорошо соответствует теории, а величина поля в пределах 15% совпадает с предсказанной. Изменение величины поля с ростом расстояния соответствует теоретической зависимости $1/R^4$ с точностью 15%.

Полученные результаты позволяют утверждать, что в пределах точности наших измерений эксперимент подтверждает правильность вывода теории о существовании квадрупольного магнитного поля у магнитоэлектрического кристалла Cr_2O_3 . Количественно подтверждены выводы об угловой зависимости радиальной и тангенциальной составляющих поля квадруполья, о зависимости

величины обеих компонент поля от расстояния между кристаллом и точкой наблюдения. Однако, если для амплитуды радиальной составляющей найдено совпадение с теорией в пределах точности опыта, то для тангенциальной составляющей поля экспериментальное значение получилось в 3,8 раза меньше, чем следует из теории. Такое расхождение скорее всего указывает на ошибку в эксперименте, поскольку написание теоретических формул в другой системе координат не может сохранить правильную величину одной компоненты и сильно изменить другую. Причины указанного расхождения пока не нашли объяснения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

-
1. I.Dzialoshinskii. Sol. St. Comm. **82**, 579 (1992).
 2. I.E.Dzialoshinskii, ЖЭТФ **10**, 626 (1960).
 3. Д.Н.Астров, ЖЭТФ **40**, 1035 (1961).