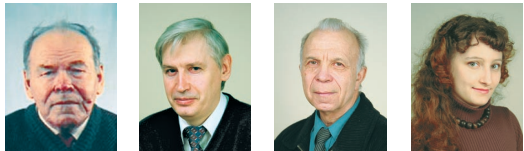


Изучение взаимосвязи электрических и магнитных свойств мультиферроиков

Туров Е.А., Меньшенин В.В., Куркин М.И., Бакулина Н.Б., Николаев В.В.



Интерес к изучению веществ с аномальными электрическими и магнитными свойствами вызван возможностями их использования в устройствах для взаимного преобразования магнитных и электрических сигналов. Эти вещества часто называют мультиферроиками, так как они обладают многими свойствами ферроэлектриков, ферромагнетиков и ферроэластиков. Основные усилия по изучению мультиферроиков направлены на решение следующих задач: 1) улучшение существующих и поиск новых веществ, относящихся к классу мультиферроиков; 2) выяснение микроскопических механизмов, ответственных за взаимосвязь электричества и магнетизма в этих веществах; 3) разработка расчетных методов, позволяющих сократить число динамических переменных, используемых для описания свойств мультиферроиков; 4) использование мультиферроиков в устройствах для обработки информации. Наши результаты относятся ко второму и третьему из перечисленных направлений.

Особенности взаимосвязи электричества и магнетизма в мультиферроиках. Сравнение с электродинамикой Максвелла

Электрические явления принято описывать с помощью векторов электрического поля \vec{E} и электрической поляризации \vec{P} , а магнитные – с помощью векторов магнитного поля \vec{H} и намагниченности \vec{M} . Основные различия в поведении электрических и магнитных векторов можно свести к различиям их симметрии по отношению к операциям пространственной инверсии I (замена r на $-r$) и обращения времени T (замена t на $-t$):

$$I\vec{P} = -\vec{P}, \quad T\vec{P} = \vec{P}, \quad I\vec{M} = \vec{M}, \quad T\vec{M} = -\vec{M} \quad (1)$$

Вектор \vec{E} преобразуется как \vec{P} , а вектор \vec{H} – как \vec{M} . Соотношения (1) можно представить наглядно (рис.1 и 2), если учесть, что в одномерном случае операция I эквивалентна зеркальному отображению. На рис. 1 изображен дипольный момент \vec{P} (образованный парой электрических зарядов q и $-q$) и его зеркальное отображение, параллельное оригиналу. На рис.2 изображен магнитный момент \vec{M} (образованный рамкой с током \vec{j}) и его зеркальное отображение, направленное с оригиналом. При замене t на $-t$ расположение зарядов на рис.1 не меняется, но меняется направление тока на рис.2.

Из-за указанных различий в симметрии

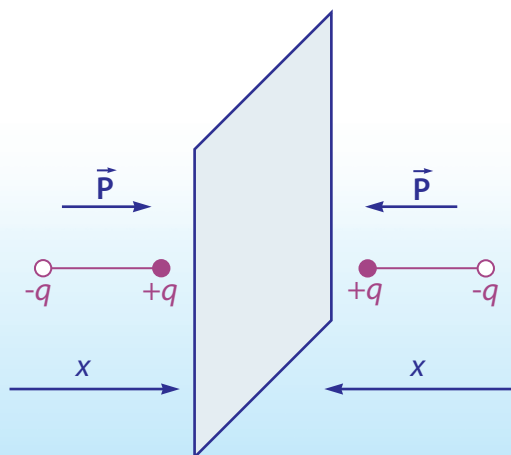


Рис. 1

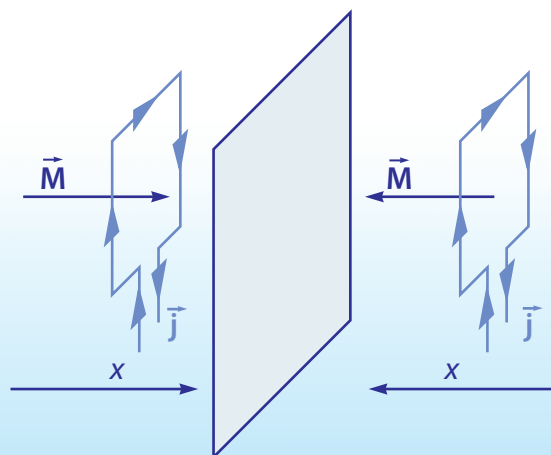


Рис. 2

уравнения Максвелла связывают между собой не сами электрические (\mathbf{E} и \mathbf{P}) и магнитные (\mathbf{H} и \mathbf{M}) векторы, а их производные по r и t . Обнаруженные Д.Н. Астровым магнитоэлектрические эффекты (намагничивание электрическим полем ($\mathbf{M}=\alpha_{ME}\mathbf{E}$) и электризация магнитным полем ($\mathbf{P}=\alpha_{PH}\mathbf{H}$)) могут связывать между собой независимые от r и t пары векторов (\mathbf{M},\mathbf{E}) и (\mathbf{P},\mathbf{H}). Это означает, что обсуждаемые эффекты относятся к новому типу взаимосвязи магнетизма и электричества, выходящему за рамки применимости классической электродинамики Максвелла. Для построения микротeorии магнитоэлектрических явлений необходимо привлекать спин-орбитальное взаимодействие, которое можно рассматривать как макропроявление микропроцессов, описываемых квантовой электродинамикой. Согласно существующим макротeorиям обсуждаемые явления могут наблюдаться только в упорядоченных веществах, которые характеризуются параметром порядка \mathbf{Q} , обладающим свойствами

$$I\mathbf{Q} = -\mathbf{Q}, \quad T\mathbf{Q} = -\mathbf{Q} \quad (2)$$

В кристаллах с таким параметром порядка из компонент векторов \mathbf{M} , \mathbf{P} и \mathbf{Q} можно составить комбинации вида:

$$V(\mathbf{M},\mathbf{P},\mathbf{Q}) = \lambda\mathbf{M}\mathbf{P}\mathbf{Q}, \quad (3)$$

инвариантные относительно операций I и T , а также других операций соответствующей группы симметрии. Выражения типа (3) описывают так называемые магнитоэлектрические взаимодействия, ответственные за магнитоэлектрические эффекты.

В отделе теоретической и математической физики ИФМ изучался один из типов таких веществ – центроантисимметричные антиферромагнетики, в которых параметром порядка, обладающим свойствами (2), является один из векторов антиферромагнетизма. Ниже перечислены результаты, полученные в этом отделе после 2000 года.

Основные результаты:

1. Предложен магнитоупругий механизм магнитоэлектрических взаимодействий $V(\mathbf{M},\mathbf{P},\mathbf{Q})$ (3).

Ранее $V(\mathbf{M},\mathbf{P},\mathbf{Q})$ считался самостоятельным видом взаимодействий наряду с обменными, спин-орбитальными и др. Предложенный меха-

низм позволяет рассматривать $V(\mathbf{M},\mathbf{P},\mathbf{Q})$ как разновидность известного магнитоупругого взаимодействия, ответственного в частности за такое явление, как магнитострикция. Отличие состоит только в том, что магнитострикция обусловлена акустическими фононами, а магнитоэлектричество — оптическими. Это означает, что вещества с хорошими магнитоэлектрическими свойствами следует искать среди магнито жестких материалов, обладающих большой магнитострикцией. Известно, что к таким материалам принадлежат соединения на основе редкоземельных атомов и химических элементов группы железа с добавками третьего элемента, стабилизирующего нужный тип кристаллической решетки, как например Nd-Fe-B. К этому типу веществ принадлежит соединение TbMnO₃, обладающее наибольшим магнитоэлектрическим эффектом.

2. Предложены эффективные методы сокращения числа динамических переменных, необходимых для описания $V(\mathbf{M},\mathbf{P},\mathbf{Q})$ (3).

Как правило, мультиферроики имеют кристаллическую структуру с большим числом атомов на элементарную ячейку. Для таких структур число динамических переменных (магнонов и фононов), описывающих изменения магнитных и решеточных состояний, оказывается порядка 100, что делает анализ магнитоэлектрических эффектов стандартными методами очень громоздкой задачей. Предложенные методы позволяют настолько сократить количество таких переменных, что их число не превышает десяти.

3. Предсказан параметрический магнитоэлектрический эффект – возбуждение колебаний электрической поляризации при параметрическом антиферромагнитном резонансе.

Две особенности отличают предсказанный эффект от других динамических магнитоэлектрических эффектов. Во-первых, сигналы, соответствующие возбуждению колебаний электрической поляризации, могут наблюдаться одновременно с сигналом параметрического АФМР. Во-вторых, частоты сигнала вдвое меньше частоты накачки, поэтому возбуждающий и регистрируемый сигналы развязаны по частоте. Указан пример вещества Cr₂TeO₆, симметрия которого допускает существование данного эффекта.