

УДК 539.2

А. К. Сойка, д-р физ.-мат. наук, профессор (БГТУ); И. Т. Боднар, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению);
И. О. Сологуб, мл. науч. сотрудник (БГТУ)

НОВЫЙ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В АКТИВИРОВАННЫХ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ КРИСТАЛЛАХ

Исследовано влияние сильного магнитного поля на оптические свойства активированных двулучепреломляющих кристаллов. Обнаружен неизвестный ранее магнитооптический эффект, заключающийся в изменении оптических индикатрис двулучепреломляющих кристаллов кварца и калий-гадолиниевого вольфрамата, активированных ионами железа и иттербия соответственно, вследствие однократного воздействия на них импульсного магнитного поля с индукцией ~40 Тл. Эти изменения сохраняются в течение длительного времени после отключения поля и, по-видимому, являются необратимыми.

The new magneto-optical effect is described. The influence of the high pulsed magnetic fields on optical properties of birefringent crystals was studied. The samples was crystals of SiO₂ and KGW both activated by paramagnetic admixture (Fe and Yb accordingly). The birefringent properties measurement was made by crossed polarizers method. It was discovered that high pulsed magnetic field with induction 40 T changes birefringent properties of SiO₂ and KGW activated crystals. The effect keeps during long time after magnetic field shutdown and seems to be inconvertible.

Введение. Известно, что внешнее магнитное поле способно существенным образом влиять на оптические свойства помещенного в него вещества. К настоящему времени основные магнитооптические явления – эффект Зеемана (расщепление уровней энергии атомов и молекул), эффект Фарадея (вращение плоскости поляризации света) и эффект Коттона – Мутона (возникновение двойного лучепреломления в изотропных средах) – достаточно хорошо изучены как экспериментально, так и теоретически, и широко используются в научных исследованиях и в технических приложениях [1].

Общей чертой известных магнитооптических явлений, имеющей определяющее значение, является то, что они наблюдаются только в присутствии (*in situ*) магнитного поля. Более того, все эти явления отличаются большим быстродействием: время установления (или исчезновения) их относительно момента включения (или выключения) внешнего магнитного поля составляет величину ~10⁻⁹ с.

К настоящему времени известны также многочисленные эффекты значительного изменения различных макроскопических характеристик немагнитных твердых тел при воздействии на них постоянных или импульсных (как слабых, так и сильных) магнитных полей, характеризующиеся тем, что эти изменения сохраняются и в отсутствие магнитного поля, т. е. являются долговременными или необратимыми [2–5].

Речь идет, прежде всего, о широком круге явлений, называемых магнитоэластическим эффектом, который заключается в магнитоиндуцированном изменении механических свойств твердых тел (пластичности, прочности, ползучести и др.). В работе [6] экспериментально установлена взаимосвязь между магнитоэластическим

(изменение микротвердости) и магнитооптическим (изменение люминесцентных свойств) эффектами в кристалле NaCl:Eu в импульсных магнитных полях. Оба эффекта имели необратимый характер, а их количественные проявления определенным образом коррелировали между собой.

Теории необратимых магнитоиндуцированных явлений пока не существует, так как не ясны элементарные физические процессы, лежащие в их основе. В связи с этим представляются актуальными экспериментальные исследования, связанные с поиском и изучением новых магнитоиндуцированных явлений. Применение в этих исследованиях сильных импульсных магнитных полей, индукция которых может быть существенно больше индукции достижимых на опыте постоянных магнитных полей, повышает вероятность обнаружения неизвестных ранее эффектов.

Основная часть. Экспериментально исследовалось влияние сильного импульсного магнитного поля с индукцией до 40 Тл на двулучепреломляющие свойства одноосных и двуосных кристаллов, активированных ионами переходных и редкоземельных металлов. Использование импульсного магнитного поля в данном случае предполагало, что целью эксперимента являлось обнаружение именно долговременных (или необратимых) изменений исследуемых свойств кристаллов, вызванных действием на них сильного магнитного поля.

В качестве образцов использовались кристаллы кварца с примесью атомов железа (~0,8% по весу) и калий-гадолиниевого вольфрамата (KGW), активированного ионами Yb³⁺ с атомной концентрацией ~2%. Оба этих материала широко применяются в оптике, оптоэлектронике и квантовой электронике.

KGW относится к кристаллам низшей категории и обладает двумя оптическими осями (бинормальными), угол между которыми $2V = 86,5^\circ$. Его оптическая индикатриса имеет форму трехосного эллипсоида, полуоси которого равны главным значениям показателей преломления $n_g \neq n_m \neq n_p$. Направления, перпендикулярные двум центральным круговым сечениям этого эллипсоида, определяют оптические оси кристалла, вдоль которых показатели преломления одинаковы.

Исследуемые образцы имели вид прямоугольных плоскопараллельных пластинок с размерами $12 \times 10 \times 3$ мм³ (кварц) и $26 \times 10 \times 3$ мм³ (KGW). Оптическая ось кварца была перпендикулярна большей стороне пластинки и составляла угол $18,1^\circ$ с ее плоскостью. Для кристалла KGW главные оси индикатрисы показателей его преломления n_g , n_m и n_p ориентировались относительно пластинки так, что ось n_g была перпендикулярна плоскости пластинки, а проекции осей n_p и n_m на эту плоскость приблизительно совпадали с направлениями соответственно большей и меньшей сторон пластинки.

Измерение двулучепреломления проводилось методом скрещенных поляризаторов при комнатной температуре. Пластина исследуемого кристалла располагалась в вертикальной плоскости на поворотном столике гониометра так, что ее наибольшая сторона была горизонтальна, а ось вращения столика совпадала с осью симметрии пластинки (рис. 1).

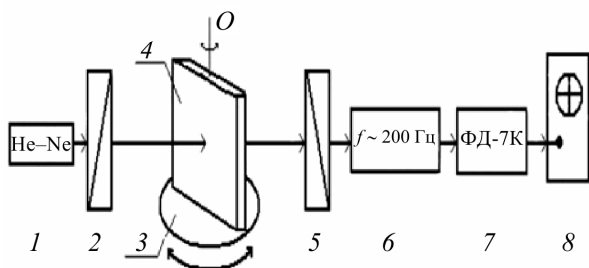


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию двулучепреломления кристаллов:
1 – He – Ne-лазер; 2 – поляризатор;
3 – поворотный столик; 4 – образец (пластинка исследуемого кристалла);
5 – анализатор; 6 – механический модулятор;
7 – фотодиод ФД-7К;
8 – осциллограф С1-70

Луч He – Ne-лазера, используемого как источник линейно поляризованного зондирующего излучения, проходил последовательно через поляризатор, пластинку (в области ее геометрического центра), анализатор, механический модулятор (частота модуляции ~ 200 Гц) и попадал на входное окно фотодиода ФД-7К, сиг-

нал которого регистрировался осциллографом С1-70. Плоскость колебаний электрического вектора излучения лазера устанавливалась в диагональном положении между скрещенными поляризаторами, т. е. под углом 45° к сторонам исследуемой пластинки.

Поворотом столика угол падения луча света на пластинку изменялся от 0 до $\pm 20^\circ$ (с точностью $\sim 0,1^\circ$). Это позволяло получать всевозможные состояния поляризации выходящего из пластинки излучения, которые для каждого фиксированного угла падения определялись величиной двулучепреломления кристалла (для KGW преимущественно $\Delta n = n_g - n_m$) в направлении распространения луча света и длины его пути в пластинке. Величина амплитуды электрического сигнала фотодиода, регистрируемого осциллографом, прямо пропорциональна интенсивности света, вышедшего из анализатора, которая, в свою очередь, целиком определяется состоянием поляризации света на выходе его из пластинки.

Эксперимент заключался в получении кривых зависимости интенсивности вышедшего из анализатора света от угла поворота пластинки (рис. 1). Эти кривые получались дважды – до и после воздействия на образцы (пластинки) магнитного поля. Особое внимание при этом уделялось обеспечению идентичности условий проведения этих экспериментов. Полученные кривые затем сравнивались друг с другом, что позволяло сделать однозначное заключение об изменении (или об отсутствии изменений) двулучепреломляющих свойств данного кристалла, вызванных воздействием сильного магнитного поля.

Все исследуемые образцы подвергались однократному воздействию импульсного магнитного поля с амплитудой индукции 40 Тл, силовые линии которого были параллельны большой стороне пластинок. Импульс магнитного поля имел синусоидальный фронт нарастания продолжительностью 20 мкс и экспоненциальный фронт спада длительностью ~ 200 мкс. Способ получения таких импульсов сильного магнитного поля описан в [7].

Были обнаружены изменения двулучепреломляющих свойств кристаллов KGW + Yb (2%) и $\text{SiO}_2 + \text{Fe}$ (0,8%) после воздействия на них магнитного поля. Так, например (рис. 2), при нормальном падении света на кварцевую пластинку до воздействия магнитного поля выходящий из нее луч поляризован по эллипсу, большая ось которого почти перпендикулярна плоскости пропускания анализатора. После воздействия магнитного поля тот же луч – при всех прочих равных условиях – имеет уже круговую поляризацию, которая практически не меняется при повороте пластинки в пределах $\pm 7^\circ$. Нечто подобное имеет место и для кристалла KGW.

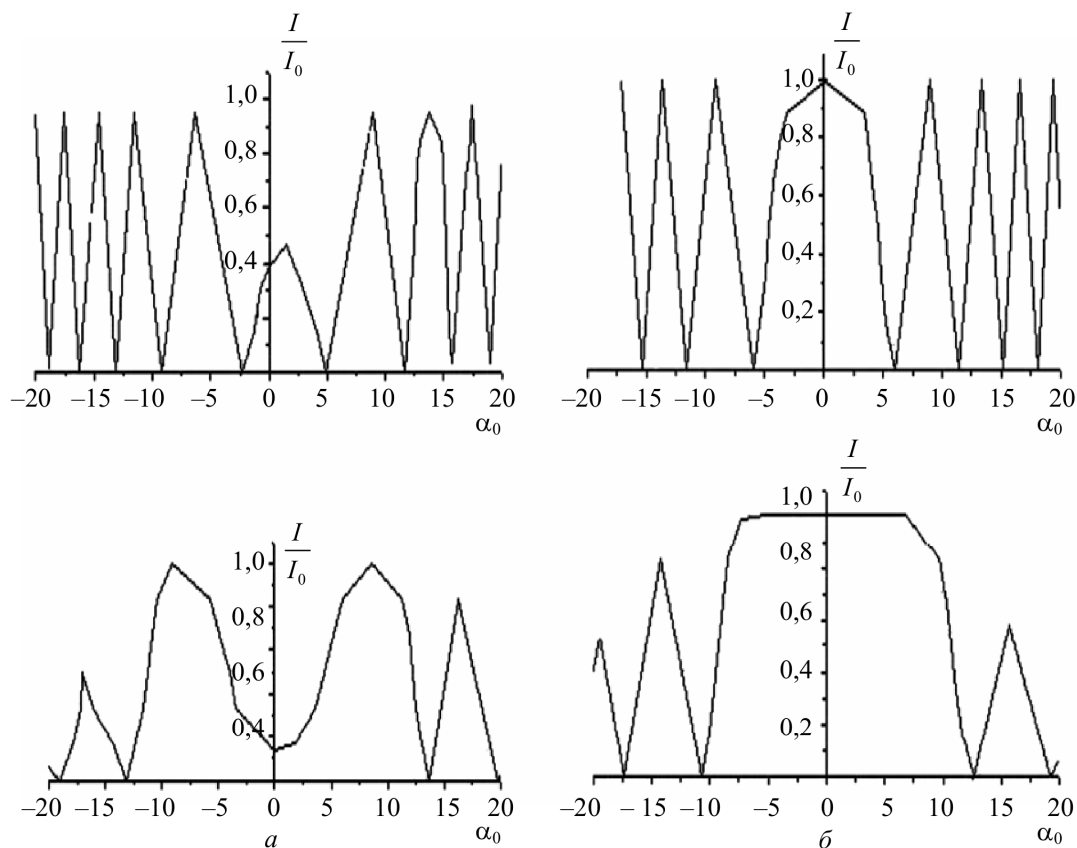


Рис. 2. Зависимости интенсивности вышедшего из анализатора света от угла падения луча лазера на пластинки исследуемых кристаллов:

a – до воздействия магнитного поля;
б – после воздействия магнитного поля

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности вышедшего из анализатора света от угла падения луча лазера на пластинки исследуемых кристаллов до и после воздействия магнитного поля.

Поскольку в наших экспериментах длительность промежутков времени между наложением на кристаллы импульсного магнитного поля и измерением их двулучепреломления составляла величину ~ 10 сут, то эти изменения, по меньшей мере, являются долговременными или, что по нашему мнению более вероятно, имеют необратимый характер.

Наибольший интерес в обнаруженном эффекте представляет собой тот факт, что действие магнитного поля, вызывающее деформацию оптической индикатрисы исследуемых кристаллов, наблюдается не *in situ*, а как эффект последствия магнитного поля, сохраняющийся на протяжении долгого времени.

Следует отметить, что описанный выше эксперимент был проведен также и с образцами-пластинками, изготовленными из чистого кристаллического кварца, однако при этом никаких магнитоиндуцированных изменений его двулучепреломляющих свойств обнаружено не было.

Это обстоятельство дает основание для того, чтобы утверждать, что решающую роль в возникновении обнаруженного магнитооптического эффекта играют примесные парамагнитные ионы Fe^{3+} и Yb^{3+} .

Одно из возможных объяснений этого явления связано с иницированием магнитным полем быстропротекающих необратимых спин-зависимых физико-химических процессов в кристаллах, вызванных переориентацией спинов валентных электронов, локализованных на примесных парамагнитных ионах как на дефектах кристаллической решетки [2, 3, 5]. Такой подход с привлечением представлений химической физики и спиновой химии к объяснению магнитоиндуцированных явлений в твердых телах в настоящее время широко обсуждается в литературе. В работе [8] показано, что пренебрежение спином частиц ведет к принципиально неверному представлению о влиянии магнитного поля на оптические свойства непроводящих кристаллов.

Заключение. Обнаружен новый магнитооптический эффект, заключающийся в изменении оптических индикатрис двулучепреломляющих кристаллов кварца и калий-гадолиниевого вольфрамата, активированных парамагнитными

примесями, вследствие однократного воздействия на них сильного импульсного магнитного поля с индукцией ~ 40 Тл. Эти изменения, по видимому, являются необратимыми. Выяснение физического механизма данного явления требует проведения дальнейших экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф08Р-025).

Литература

1. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

2. Головин, Ю. И. Магнитопластичность твердых тел / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, № 5. – С. 769–803.

3. Моргунов, Р. Б. Спиновая механика в физике пластичности / Р. Б. Моргунов // УФН. – 2004. – Т. 174. – Вып. 2. – С. 131–154.

4. Магнитопластический эффект в Al и Al-Zn в сильном импульсном магнитном поле / А. К. Сойка [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 20–23 окт. 2009 г. / ГНПО «Научно-практический центр Национальной

академии наук Беларуси по материаловедению»; редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2009. – С. 128–129.

5. Зельдович, Я. Б. Магнитоспиновые эффекты в химии и в молекулярной физике / Я. Б. Зельдович, А. Л. Бучаченко, Е. Л. Франкевич // УФН. – 1988. – Т. 155. – Вып. 1. – С. 3–45.

6. Влияние магнитного поля на фотолуминесценцию примеси *Ei* в процессе ее агрегирования в кристаллах NaCl / Р. Б. Моргунов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т. 76. – Вып. 5. – С. 366–370.

7. Бойко, Б. Б. Импульсный магнит с плазменным кроубаром / Б. Б. Бойко, А. К. Сойка, Л. П. Митьковская // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 2. – С. 184–186.

8. Родионов, В. Н. О влиянии сильных электрического и магнитных полей на пространственную дисперсию и анизотропию оптических свойств полупроводника / В. Н. Родионов, Г. А. Кравцова, А. М. Мандель // Письма в ЖЭТФ. – 2003. – Т. 78. – Вып. 4. – С. 253–257.

Поступила в редакцию 31.03.2010