

УДК 539.2

А. К. СОЙКА¹, И. Т. БОДНАРЬ², И. О. СОЛОГУБ¹**ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ,
АКТИВИРОВАННЫХ ПАРАМАГНИТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ**¹Белорусский государственный технологический университет²Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению

(Поступила в редакцию 09.06.2010)

Исследовано влияние сильного магнитного поля на оптические свойства активированных двулучепреломляющих кристаллов. Обнаружен неизвестный ранее магнитооптический эффект, заключающийся в деформации 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. Установлено, что решающую роль в возникновении обнаруженного явления играют примесные парамагнитные ионы. Эффект сохраняется в течение длительного времени после отключения поля и, видимо, является необратимым.

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 двулучепреломления в изотропных средах) — достаточно хорошо исследованы как экспериментально, так и теоретически и широко используются в научных исследованиях и технических приложениях [1]. При этом общим свойством практически всех магнитооптических эффектов является то, что они наблюдаются только в присутствии (*in situ*) магнитного поля. Более того, их инерционность относительно индукции внешнего магнитного поля весьма мала ($\sim 10^{-9}$ с) [2].

В то же время в ряде экспериментов обнаружены изменения различных, в том числе и оптических макроскопических характеристик вещества при воздействии на него постоянных, переменных или импульсных магнитных полей (как слабых, так и сильных), характеризующиеся тем, что они сохраняются и в отсутствие магнитного поля, т. е. являются долговременными или необратимыми [3—7]. Экспериментально установлена также корреляция между магнитопластическими и магнитооптическими явлениями, когда изменение механических характеристик кристалла вследствие воздействия на него маг-

нитного поля ($B \sim 30$ Тл) определенным образом влияло на проявление магнитооптического эффекта, наблюдаемого в этом кристалле, и наоборот [8; 9]. Объяснения, тем более теории подобного рода явлений, пока нет, поскольку 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, имеющих долговременный характер.

Нами экспериментально исследовано влияние сильного импульсного магнитного поля с индукцией 40 Тл на двулучепреломляющие свойства одноосных и двуосных кристаллов, активированных ионами переходных и редкоземельных металлов. Использование импульсного магнитного поля в данном случае означает, что целью эксперимента являлось обнаружение именно долговременных (или необратимых) изменений оптических свойств исследуемых кристаллов.

В качестве образцов использовались кристаллы кварца с примесью атомов железа ($\approx 0,8$ % по весу) и калий-гадолиниевого вольфрамата (КГВ), активированного ионами Yb^{3+} с атомной концентрацией ≈ 2 %. Оба этих материала достаточно хорошо изучены и широко применяются в оптике, оптоэлектронике и квантовой электронике.

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

Исследуемые образцы имели вид прямоугольных плоскопараллельных пластинок с размерами $12 \times 10 \times 3$ мм (кварц) и $26 \times 10 \times 3$ мм (КГВ). Оптическая ось кварца была перпендикулярна большей стороне пластинки и составляла угол $18,1^\circ$ с ее плоскостью. Для кристалла КГВ 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.

Эксперимент проводился при комнатной температуре. Регистрация величины двулучепреломления производилась методом скрещенных поляризаторов. Пластинка 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). Луч He—Ne лазера, используемого в качестве источника линейно поляризованного зондирующего излучения, проходил последовательно через поляризатор, пластинку (примерно в области ее геометрического центра), анализатор, механический модулятор (частота модуляции ~ 200 Гц) и попадал на входное окно фотодиода ФД-7К, сигнал которого подавался на осциллограф С1-70. Плоскость колебаний электрического вектора излучения лазера устанавливалась в диагональное положение относительно плоскостей пропускания поляризатора и анализатора, т. е. под углом 45° к сторонам исследуемой пластинки.

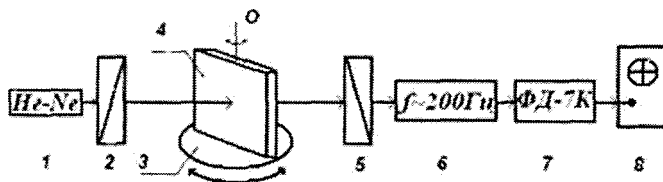


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию двулучепреломления кристаллов: 1 — He—Ne лазер; 2 — поляризатор; 3 — поворотный столик; 4 — образец (пластинка исследуемого кристалла); 5 — анализатор; 6 — механический модулятор; 7 — фотодиод ФД-7К; 8 — осциллограф (типа С1-70)

Поворотом столика гониометра угол падения луча света на пластинку изменялся от нуля 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 длиной его пути в пластинке. Состояние поляризации прошедшего через образец света определяет, в свою очередь, интенсивность света, вышедшего из анализатора, и прямо пропорциональную ей величину амплитуды электрического сигнала фотодиода, наблюдаемого на экране осциллографа.

Эксперимент заключался в получении кривых зависимости интенсивности вышедшего из анализатора света от угла поворота пластинки (рис. 1). Такие кривые получались дважды — до и после воздействия на образцы (пластинки) каждого из кристаллов импульсного 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 на него сильного магнитного поля.

Исследуемые пластинки кристаллов кварца и KGW подвергались однократному воздействию импульсного магнитного поля с амплитудой индукции 40 Тл. При этом они располагались в катушке магнита так, что силовые линии магнитного поля были параллельны большой стороне пластинок. В наших экспериментах использовалось униполярное импульсное магнитное поле с синусоидальным фронтом нарастания длительностью ≈ 20 мкс и экспоненциальным фронтом спада индукции длительностью около 200 мкс. Осциллограмма импульса магнитного поля представлена на рис. 2. Способ получения таких импульсов сильного магнитного поля описан в работе [10].

На рис. 3 представлены кривые зависимости интенсивности вышедшего из анализатора света от угла падения луча лазера на пластинки исследуемых кристаллов до и после воздействия на них магнитного поля. Сравнение этих кривых показывает, что после однократного воздействия на кристаллы KGW + Yb (2 %) и SiO₂ + Fe (0,8 %) импульсного магнитного поля с амплитудой индукции 40 Тл их двулучепреломляющие свойства изменяются.

Например, при нормальном падении света на кварцевую пластинку (рис. 3) до воздействия на нее магнитного поля выходящий из пластинки луч поляри-

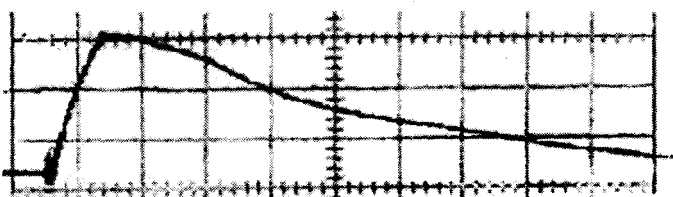


Рис. 2. Осциллограмма импульса магнитного поля с индукцией 40 Тл. Развертка по горизонтали 20 мкс/деление

зован по эллипсу, большая ось которого почти перпендикулярна плоскости пропускания анализатора. После воздействия на кварц магнитным полем 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 также и для кристалла KGW.

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

Аналогичный эксперимент был проведен также и с образцами (пластинками), изготовленными из чистого кристаллического кварца, геометрия которых была такой же, как и у исследуемых образцов активированного кварца, однако при этом никаких магнитоиндуцированных изменений его двулучепре-

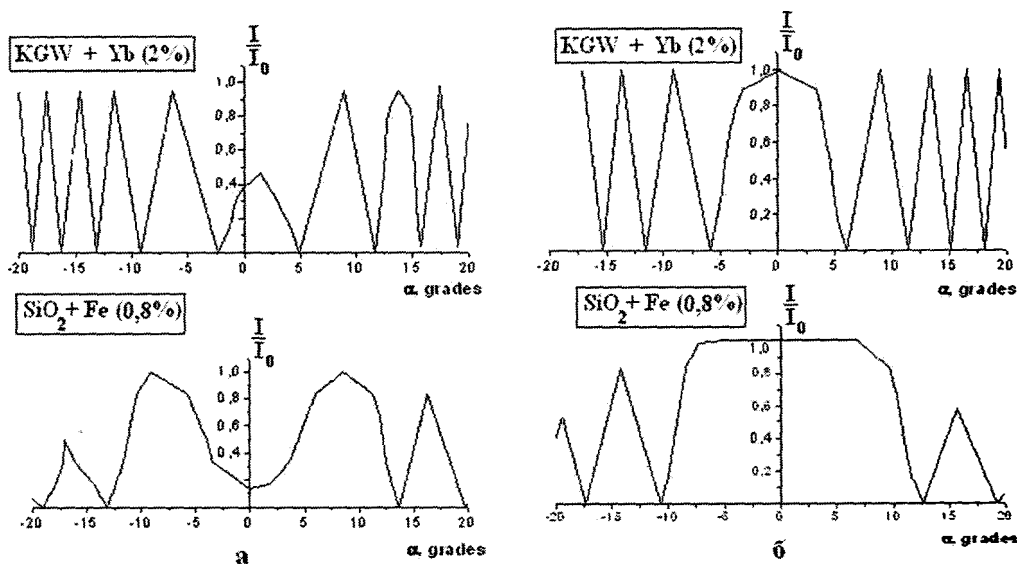


Рис. 3. Зависимости интенсивности вышедшего из анализатора света от угла падения луча лазера на пластинки исследуемых кристаллов: а — до воздействия, б — после воздействия магнитного поля

ломляющих свойств обнаружено не было. Это обстоятельство дает основание полагать, что определяющую роль в возникновении описанного выше магнитооптического эффекта, заключающегося в деформации оптической индикатрисы исследованных кристаллов сильным импульсным магнитным полем, играют примесные парамагнитные ионы Fe^{3+} и Yb^{3+} .

Как уже отмечалось выше, проблема интерпретации рассматриваемых магнитоиндуцированных оптических или пластических явлений заключается в том, что пока нам мало что известно о механизмах влияния магнитного поля (тем более — долговременного или необратимого) на макроскопические свойства кристаллов. Например, магнитное поле с амплитудой индукции ~ 40 Тл практически полностью подавляет люминесцентные свойства лазерного рубина [7], а под воздействием магнитных полей $\sim (1-10)$ Тл (постоянных или импульсных) параметры, характеризующие пластичность кристаллов, могут изменяться в несколько раз [3; 4; 6; 8; 9]. Объяснить эти явления энергетическим воздействием магнитного поля на частицы вещества нельзя, так как слишком мала энергия, которую может сообщить отдельной частице или любому структурному элементу магнитоупорядоченного вещества даже сравнительно сильное магнитное поле. Так, для частицы с магнитным моментом в один магнетон Бора в поле ~ 10 Тл эта энергия составляет величину $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ эВ, что почти на два порядка меньше тепловой энергии частиц при комнатной температуре, не говоря уже о значениях энергии оптических переходов или энергии активационных барьеров для движения дислокаций в кристаллах, имеющих величины ~ 1 эВ. Очевидно, что увеличение индукции магнитного поля до 40 Тл не меняет ситуацию радикальным образом.

Противоречие между малостью энергии магнитного возмущения и масштабом наблюдаемых магнитоиндуцированных оптических и механических явлений нельзя устранить, если оставаться в рамках положений физики оптических и пластических процессов в кристаллах и рассматривать лишь механизмы прямого воздействия на них внешнего магнитного поля. Видимо, в данном случае необходимо допустить существование механизмов опосредованного влияния магнитного поля на свойства вещества.

В последнее время для объяснения влияния магнитных полей на макроскопические характеристики твердых тел в литературе широко обсуждается концепция, основанная на использовании представлений химической физики и спиновой химии [2—4; 11; 12]. Ее суть заключается в иницировании магнитным полем быстропотекающих необратимых спин-зависимых физико-химических процессов в твердом теле, обусловленных переориентацией спинов электронов, локализованных на примесных парамагнитных ионах или на дефектах кристаллической решетки. Это иницирование осуществляется посредством снятия внешним магнитным полем спиновых запретов на возможные каналы возникновения и развития таких процессов (реакций), которые могут существенным образом (для тех или иных явлений) изменить электронную структуру кристалла. В работе [11] показано, что при рассмотрении влияния магнитного поля на оптические свойства непроводящих кристаллов необходимо учитывать переориентацию спинов частиц. Там же отмечается, что в случае сильных магнитных полей поляризационные свойства кристаллов могут существенным образом зависеть от взаимной ориентации спинов частиц.

Однако такая концепция магнитоиндуцированных явлений имеет пока ряд нерешенных вопросов [13; 14]. Прежде всего, не определены конкретные типы спин-зависимых химических процессов (реакций), посредством которых магнитное поле изменяет те или иные свойства твердых тел. Кроме того, в рамках этой концепции, например, в случае магнитоэластических явлений предсказанные увеличения пробега дислокаций в кристаллах должны быть на уровне $\sim 1\%$, в то время как экспериментальные значения достигают величин $\sim 100\%$ [13], а в случае магнитоиндуцированных оптических явлений трудно объяснить зависимость некоторых из них от температуры [5].

Таким образом, выяснение природы обнаруженного магнитооптического эффекта требует проведения дальнейших как экспериментальных, так и теоретических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф08Р-025).

Литература

1. Вонсовский С. В. Магнетизм. М., 1971. — 1032 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля и их применения. М., 1972. — 391 с.
3. Головин Ю. И. // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, № 5. С. 769—803.
4. Моргунов Р. Б. // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174, вып. 2. С. 131—154.
5. Зельдович Я. Б., Бучаченко А. Л., Франкевич Е. Л. // Успехи физ. наук. 1988. Т. 155, вып. 1. С. 3—45.
6. Осипьян Ю. А., Головин Ю. И., Лопатин Д. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69, вып. 2. С. 110—113.
7. Бойко Б. Б., Сойка А. К. // Докл. Акад. наук БССР. 1978. Т. 22, № 12. С. 1072—1074.
8. Моргунов Р. Б., Шмурак С. З., Пономарев Б. К. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76, вып. 5. С. 366—370.
9. Головин Ю. И., Моргунов Р. Б., Баскакова А. А., Бадылевич М. В. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69, вып. 2. С. 114—118.
10. Сойка А. К. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 14, вып. 3. С. 1238—1241.
11. Родионов В. Н., Кравцова Г. А., Мандель А. М. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78, вып. 4. С. 253—257.
12. Альшиц В. Е., Даринская Е. В., Колдаева М. В., Петрижик Е. А. // Кристаллография. 2003. Т. 43, № 5. С. 826—854.
13. Моргунов Р. Б. // Вестн. РФФИ. 2003. № 2. С. 19—46.
14. Закревский В. А., Пахотин В. А., Шульдинер А. В. // Физика твердого тела. 2002. Т. 44, № 11. С. 1990—1993.

A. K. SOIKA, I. T. BODNAR, I. O. SOLOHUB

THE INFLUENCE OF HIGH MAGNETIC FIELD ON BIREFRIGENT PROPERTIES OF CRYSTALS ACTIVATED BY PARAMAGNETIC ADMIXTURE

Summary

A new magneto-optical effect is described. The influence of the high pulsed magnetic fields on optical properties of birefringent crystals was studied. The samples were crystals of SiO_2 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 SiO_2 and KGW activated crystals. The effect keeps during long time after magnetic field shutdown and seems to be inconvertible.