

*Л.П. Пономаренко,
доцент НТУУ «КПИ», стажер Центра исследований научно-технического
потенциала и истории науки им. Г.М. Доброва НАН Украины*

Экспериментальные исследования магнитоупорядоченных структур в Украине (70—80-е годы XX ст.)

Магнитооптические методы исследования магнитоупорядоченных структур способствуют пониманию механизмов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, а также оказывают влияние на решение современных задач технологии записи, обработки и передачи информации в различных запоминающих и управляющих устройствах, в том числе в элементах интегральной оптики.

Одним из важных научных направлений, возникших и получивших развитие в Украине в 70—80-е годы XX ст., стало изучение спектральных свойств магнитоупорядоченных веществ, в частности антиферромагнетиков. Широкомасштабные экспериментальные и теоретические исследования в области спектроскопии антиферромагнетиков послужили основой для формирования современных представлений о взаимодействии света с магнитными веществами. Так, академик НАН Украины А.Ф.Прихотько отмечала: «Именно в нашей Академии впервые в мире начали изучаться оптические свойства магнитных кристаллов. На протяжении всех лет техника измерений совершенствовалась, круг веществ расширился, результаты углублялись». Значительным результатом работ, выполненных в Украине в Физико-техническом институте низких температур НАН Украины (ФТИНТ НАНУ) под руководством академика НАН Украины В.В.Еременко, стало применение экситонного подхода к пониманию процессов взаимодействия света с магнитоупорядоченными кристаллами. Экспериментально

было доказано, что в формировании спектра поглощения кристаллического антиферромагнетика принимает участие экситон-магнонное взаимодействие. Этот вывод был сделан в 1963 г. В.В.Еременко и А.И.Беляевой в результате применения экспериментальной методики, сочетающей использование техники импульсных магнитных полей с низкими температурами [1]. Важным этапным результатом, полученным в спектроскопии антиферромагнетиков впервые, стало выявление непосредственного влияния магнитной структуры на формирование оптического спектра. Так, в 1964 г. В.В.Еременко и Ю.А.Попков изучили действие сильного магнитного поля на спектр поглощения MnF_2 . Они обнаружили, что при воздействии внешнего магнитного поля, величина которого больше критической, происходит изменение структуры спектра поглощения. Эти исследования доказали электрически дипольный характер большинства полос поглощения в оптических спектрах антиферромагнитных кристаллов [2].

Дальнейшее развитие экситонного подхода применительно к проблеме взаимодействия магнитоупорядоченных кристаллов с электромагнитным излучением способствовало началу проведения экспериментов по изучению люминесценции в антиферромагнитных соединениях марганца. В 1967 г. В.В.Еременко и Э.В.Матюшкин экспериментально однозначно доказали эффект миграции энергии электронного возбуждения по кристаллу магнитного диэлектрика и сделали вывод, что формирование спектров лю-

минесценции и поглощения в магнитном поле определяется экситон-магнонными переходами [3]. Окончательное экспериментальное доказательство экситонного характера оптических возбуждений антиферромагнитных кристаллов путем наблюдения в них индуцированного магнитным полем магнитного давидовского расщепления было проведено в 1970 г. В.В.Еременко и В.П.Новиковым [4].

Таким образом, в формировании современных представлений о взаимодействии света с магнитоупорядоченными кристаллами первостепенную роль сыграли именно экспериментальные работы, выполненные в Украине в 70—80-е годы XX ст.

Обнаружение зависимости свойств магнитоупорядоченных веществ от воздействия на кристалл внешних магнитных полей позволило провести серию исследований спектральных характеристик магнитоупорядоченных систем различной размерности. В настоящее время это одно из наиболее перспективных направлений физики твердого тела, развиваемое в рамках общей тенденции исследования низкоразмерных систем, связанного с поисками высокотемпературной сверхпроводимости.

Наряду с пионерскими исследованиями в области спектроскопии антиферромагнитных кристаллов в Украине были получены фундаментальные результаты при изучении магнитооптических свойств различных магнитных структур в широком спектральном диапазоне. Большой цикл оригинальных исследований по выявлению связи магнитной симметрии кристалла с индуцированными внешним воздействием оптическими свойствами был осуществлен во ФТИНТе в конце 70-х — середине 80-х годов В.В.Еременко, Н.Ф.Харченко, Л.И.Белым, О.П.Тутакиной и др. Актуальность этих исследований определялась прежде всего недостаточной изученностью свойств и структуры антиферромагнитных веществ. И если исследование доменной

структуры ферромагнетиков получило широкое развитие в физике и технике магнитных материалов, то антиферромагнитные домены оказались исследованными в значительно меньшей степени. Поэтому разработка методов наблюдения и изучения доменной структуры антиферромагнетиков стала одной из важных задач современной физики магнитных явлений. До экспериментальных работ, выполненных в Харьковском физико-техническом институте низких температур, о существовании антиферромагнитных доменов судили только косвенно по измерению величин пьезомагнитного, магнитоэлектрического эффектов, магнитострикции. Считалось, что антиферромагнитные домены недоступны визуальному наблюдению, поскольку эффект Фарадея нечувствителен к вектору антиферромагнетизма, а эффект Коттона—Мутона не зависит от изменения направления антиферромагнитного вектора на противоположное [5]. Расчет показал, что внешнее магнитное поле может приводить к линейной зависимости от поля диагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости. И хотя на первый взгляд этот результат не согласуется с симметричными соотношениями Онсагера для кинетических коэффициентов [6], теоретически было показано, что в магнитном поле теряется один из элементов симметрии.

Было известно, что для некоторых типов антиферромагнитных структур в разложении тензора диэлектрической проницаемости по степеням вектора намагниченности (\mathbf{M}) и антиферромагнетизма (\mathbf{L}), магнитного поля (\mathbf{H}) содержатся слагаемые вида $(\mathbf{L}_i \mathbf{H}_k)$. Эти слагаемые $(\mathbf{L}_i \mathbf{H}_k)$ являются линейными по \mathbf{H} , а также имеют различный знак вектора антиферромагнетизма \mathbf{L} . Оказалось, что именно это различие в знаке открывает возможность наблюдения 180-градусных антиферромагнитных доменов с помощью магнитооптических эффектов, линейных по \mathbf{H} . Суще-

твление таких антиферромагнитных слагаемых ($L_i H_k$) в тензоре электропроводности, имеющем вид, аналогичный тензору диэлектрической проницаемости, показали в 1962 г. Е.А.Туров и В.Г.Шавров [7]. В 1974 г. Р.В.Писарев рассмотрел подобное слагаемое в тензоре диэлектрической проницаемости применительно к магнитооптическим проблемам [8]. Но, несмотря на эти публикации, внимание на возможность использования полученного результата для непосредственной оптической визуализации 180-градусных антиферромагнитных доменов обращено не было.

В конце 70-х годов XX ст. украинские ученые доказали, что понижение пространственно-временной симметрии кристалла при его магнитном упорядочении способствует появлению новых спонтанных и индуцированных оптических эффектов, запрещенных в магнитоупорядоченных средах. Экспериментальное и теоретическое изучение зависимости оптических свойств прозрачных антиферромагнитных сред от их симметрии и подрешеточного строения впервые позволило обнаружить новый магнитооптический эффект, разрешенный в магнитных кристаллах без центра антиинверсии. Анализ симметричных соотношений для кинетических коэффициентов показал возможность существования в магнитоупорядоченных кристаллах таких новых магнитооптических эффектов, как линейное по полю двупреломление линейно поляризованного света, квадратичное по полю магнитное вращение плоскости поляризации, а также эффектов более высоких порядков.

Наиболее полно теоретически и экспериментально новый магнитооптический эффект был исследован на примерах антиферромагнитных кристаллов различной симметрии: фторида кобальта (CoF_2), карбоната кобальта ($CoCO_3$), диспрозиевого ортоферрита ($DyFeO_3$). Экспериментальное исследование антиферромагнетиков различной магнит-

ной структуры способствовало всестороннему изучению проявлений открытого эффекта. Новое магнитооптическое явление получило в научной литературе название линейного магнитооптического эффекта (ЛМОЭ) [9, 10].

Суть обнаруженного эффекта состоит в индуцировании магнитным полем линейного по полю двупреломления не циркулярно поляризованного, а линейно поляризованного света. В этом заключается его принципиальное отличие от эффекта Фарадея. Оказалось, что новый эффект осуществляется в широком классе магнитных кристаллов, не имеющих в качестве элемента симметрии операции одновременной инверсии пространственных и спиновых координат. Как следствие такое свойство симметрии приводит либо к линейному по полю изменению главных показателей преломления, либо к такому же повороту оптической индикатрисы кристалла. Особенно ярко это свойство проявляется в высокосимметричных антиферромагнитных кристаллах при продольной геометрии опыта, когда спины подрешеток, внешнее поле и направление распространения света параллельны друг другу. В этих случаях возможно понижение оптического класса кристалла от оптически одноосного к двуосному при сохранении симметрии ионной подсистемы и коллинеарности намагниченностей подрешеток. По своему проявлению ЛМОЭ подобен линейному электрооптическому эффекту. Большая величина эффекта в видимой области спектра для CoF_2 ($d\theta/dH = \pm 0,85 \cdot 10^{-1} \text{кЭ}$ при $\lambda = 4000 \text{ \AA}$) и $DyFeO_3$ ($d\theta/dH = \pm 1,3 \cdot 10^{-1} \text{кЭ}$, $\lambda = 5900 \text{ \AA}$, где θ — угол поворота оси индикатрисы) впервые позволила провести визуальные наблюдения 180-градусных антиферромагнитных доменов. До этих экспериментов считалось, что визуализировать 180-градусные антиферромагнитные домены возможно только с помощью методов рентгеноструктурного анализа. Уже первые эксперименты, выполнен-

ные для CoF_2 , выявили закономерности изменения доменной антиферромагнитной структуры в магнитном поле [11]. Украинские ученые не только выполнили эксперименты, подтверждающие существование и возможность наблюдения 180-градусных антиферромагнитных доменов с помощью ЛМОЭ, но также разработали оригинальные методики исследования антиферромагнитной доменной структуры ряда антиферромагнитных кристаллов. Эти эксперименты открыли новую страницу в проблеме изучения доменной структуры антиферромагнитных кристаллов. Впоследствии академик РАН А.М. Прохоров так оценит значение цикла исследований, выполненных украинскими исследователями: «Использование нового магнитооптического эффекта для идентификации антиферромагнитных доменов является красивым и тонким экспериментальным достижением, открывающим перспективные пути для дальнейших поисков. Подобные работы

служат образцом академического исследования... Следует говорить о фундаментальном высококлассном исследовании, уже использованном для других (в частности материаловедческих) задач и имеющем разнообразные перспективы для приложений». Новый магнитооптический эффект открыл новые возможности изучения фазовых переходов, процессов зародышеобразования магнитных структур для целей записи и обработки информации в различных запоминающих и управляющих устройствах и элементах интегральной оптики. Разработанный на основе ЛМОЭ метод визуализации показал перспективу ранее недоступного прямого контроля за однородностью антиферромагнитного состояния кристалла [12]. Таким образом, экспериментальные исследования антиферромагнитных веществ, проведенные в Украине в 70—80-е годы XX ст., оказали значительное влияние на формирование прикладной магнитооптики.

1. Еременко В.В., Беляева А.И. О температурной зависимости ширины полос оптического поглощения кристаллов MnF_2 // ЖЭТФ. — 1963. — Т. 44. — С. 469.
2. Еременко В.В., Попков Ю.А. // Укр. фіз.журн. — 1963. — Т. 8. — С. 88. — То же. Eremenko V.V., Popkov Yu.A. // Physica Status Solidi. — 1965. — Vol. 12. — P. 627.
3. Механизм усиления люминесценции антиферромагнетиков в магнитном поле / В.В.Еременко, Э.В.Матюшкин, В.В.Шапиро, Р.Я.Брон // ФНТ. — 1977. — Т. 3, № 1. — С. 127—130.
4. Еременко В.В., Новиков В.П. Давыдовское расщепление экситонной линии в антиферромагнитном RbMnF_3 // Письма в ЖЭТФ. — 1970. — Т. 11, вып. 10. — С. 478—482.
5. Фарзтдинов М.М. Структура антиферромагнетиков // УФН. — 1964. — Т. 84, № 5. — С. 611—649.
6. Onsager L. // Phys.Rev. — 1942. — Vol. 62. — P. 559; 1944. — Vol. 65. — P. 117.
7. Туров Е.А., Шавров В.Г. // ЖЭТФ. — 1962. — Т. 43. — С. 2273.
8. Физика магнитных диэлектриков. — Л.: Наука, 1974.
9. Харченко Н.Ф., Еременко В.В., Белый Л.И. Индуцированное продольным магнитным полем понижение оптического класса антиферромагнитного кристалла // Письма в ЖЭТФ. — 1978. — Т. 22, вып. 8. — С. 351—355.
10. Харченко Н.Ф., Еременко В.В., Тутакина О.П. Билинейное по ферро- и антиферромагнитному векторам двупреломление света в карбонате кобальта // Письма в ЖЭТФ. — 1978. — Т. 27, вып. 6. — С. 466—470.
11. Еременко В.В., Харченко Н.Ф., Белый Л.И. Визуальное наблюдение 180-градусных антиферромагнитных доменов // Письма в ЖЭТФ. — 1979. — Т. 29. — С. 432—435.
12. Белый Л.И., Харченко Н.Ф. Магнитооптические исследования разрушения магнитным полем антиферромагнитной структуры карбоната железа. Деполяризация света в процессе магнитного превращения // ФНТ. — 1977. — Т. 3. — С. 1040—1049.