

Умид РУСТАМОВ,

к.ф.-м.н., доцент, Ташкентский экономический и педагогический институт

E-mail: rustamov2110@mail.ru

Рецензент: Тураев Абдумажид – заместитель директора, Центр развития нанотехнологий Национального Университета Узбекистана, к.ф.-м.н.

MEASUREMENT OF MAGNETIC CIRCULARLY POLARIZED LUMINESCENCE IN HOLMIUM-CONTAINING Annotation

In this work, a magneto-optical spectrometer based on light modulation created by a photoelastic modulator of an original design was designed and created. The system was tested by measuring the degree of MCPL in crystals of holmium-containing garnets, carried out in a strong magnetic field using various light sources.

Key words: Magnetooptics, rare earth metals, polarization, luminescence, modulation, sample, spectroscopy, signal, intensity.

TARKIBIDA GOLMIY BO'LGAN GRANAT KRISTALLARIDA MAGNIT DOIRAVIY POLYARIZATSIYALANGAN LYUMINESSENSIYANI O'LCHASH

Annotatsiya

Ushbu ishda original konstruksiyada fotoelastik modulyator vositasida yorug'likni modulyatsiyalashga asoslangan magnitoptik spektrometr sistemasi loyihalangan va yaratilgan. Ushbu sistema turli yorug'lik manbalaridan foydalangan holda, kuchli magnit maydonda, tarkibida golmiy bo'lgan granat kristallarida magnit doiraviy polarizatsiyalangan lyuminessensiya darajasini o'lchash orqali sinovdan o'tkazildi.

Kalit so'zlar: Magnitoptika, nodir yer metall, polarizatsiya, lyuminessensiya, modulyatsiya, namuna, spektroskopiya, signal, intensivlik.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРИСТАЛЛАХ ГОЛЬМИЙ - СОДЕРЖАЩИХ ГРАНАТОВ

Аннотация

В настоящей работе спроектирован и создан магнитооптический спектрометр, основанный на модуляции света, создаваемой фотоупругим модулятором оригинальной конструкции. Система была протестирована путем измерений степени МЦПЛ в кристаллах гольмий-содержащих гранатов, выполненных в сильном магнитном поле с использованием различных источников света.

Ключевые слова: Магнитооптика, редкоземельные металлы, поляризация, люминесценция, модуляция, образец, спектроскопия, сигнал, интенсивность.

Введение. Магнитооптическая спектроскопия - передовой и важный метод исследования твердотельных материалов. Магнитооптика дает не только информацию о влиянии магнитного поля на энергетические уровни квантовой системы (зеemanовская поляризационная спектроскопия), но и информацию об энергетической структуре как 3d-ионов переходных металлов, так и 4f-ионов редкоземельных металлов в сложных кристаллах. Это также может дать физическую информацию о межзонных и внутризонных оптических переходах в полупроводниках и металлах, обнаруживая симметрию парамагнитных центров и отображая структуру магнитных доменов.

В настоящее время для получения конкретной информации о возбужденных состояниях 3d - и 4f - ионов часто используют метод магнитной циркулярно-поляризованной люминесценции (МЦПЛ). "Поглощающим" аналогом МЦПЛ является широко используемый метод магнитного кругового дихроизма (МКД). Оба метода позволяют измерять важные физические параметры, такие как зеemanовское расщепление, g-факторы, соотношение скоростей радиационной и спин-решеточной релаксации в возбужденном состоянии и степень термализации возбужденных состояний.

Обзор литературы. Для реализации специализированных магнитооптических измерений необходимо использовать методы поляризационной модуляции, среди них обычно применяется метод эллиптической поляризационной модуляции [1,2]. Этот метод работает на основе различных модуляторов поляризации, таких как ротаторы Фарадея, ячейки Погкельса и фотоупругие модуляторы [3,4]. На практике фотоупругая модуляция показала особые преимущества и часто используется. Принципы модуляции поляризации с помощью фотоупругих модуляторов изложены в работах [5,6]. Модуляция эллиптичности света, вызванная колебаниями в стержне изотропного материала, применяется в оптической спектроскопии и эллипсометрии [5,6]. Основным преимуществом является его способность измерять сигналы со 100% глубиной модуляции, что очень важно в случае сильного поглощения и слабого отражения или излучения. Кроме того, для таких модуляторов можно использовать широкоапертурные пучки [5].

Методология исследования. В наших магнитооптических измерениях с использованием проходящего (МКД) или излучаемого (МЦПЛ) света на исследуемый образец, находящийся в магнитном поле, проецируется так называемое естественное (полностью неполяризованное) световое излучение. Ориентация магнитного поля параллельна распространению света. Свет, выходящий из образца в магнитном поле, частично поляризован. В данной геометрии эксперимента свет частично циркулярно-поляризован и может быть охарактеризован степенью циркулярной поляризации P:

$$P = \frac{\Phi_+ - \Phi_-}{\Phi_+ + \Phi_-} \quad (1)$$

где Φ_+ и Φ_- — потоки право- (+) и лево- (-) циркулярно поляризованных компонент некогерентного света. Степень круговой поляризации P можно измерить с помощью фотоупругого модулятора и линейного поляризатора [5]. Интенсивность света, выходящего из фотоупругого модулятора, имеет постоянную и переменную составляющие и может быть представлена в виде ряда гармоник:

$$\Phi = \frac{\Phi_+ + \Phi_-}{2} + \frac{\Phi_+ - \Phi_-}{2} \sin \varphi = \frac{\Phi_+ + \Phi_-}{2} + \frac{\Phi_+ - \Phi_-}{2} [2J_1(\varphi_M) \sin \Omega t + \dots] \quad (2)$$

где φ — сдвиг фазы, вызванный двойным лучепреломлением, определяемый формулой (1), $2J_1(\varphi_M)$ — функции Бесселя, а φ_M — максимальный сдвиг фазы, индуцированный модулятором при определенном напряжении питания. В

ряду гармоник (2) функции Бесселя с индексами $i > 1$ можно экспериментально удалить с помощью синхронного усилителя, настроенного на сигнал частоты Ω , т.е. все частоты, кратные Ω , фильтруются синхронным усилителем, тогда (2) можно переписать как:

$$\frac{I(\Omega)}{I(0)} = \frac{K_1 \Phi(\Omega)}{K_2 \Phi(0)} = 2J_1(\varphi_M)K \sin \Omega t = APK \sin \Omega t \quad (3)$$

Где $K_{1,2}$ – коэффициенты пропорциональности между соответствующими токами фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и интенсивностями света; $I(\Omega)$ и $I(0)$ – соответствующие переменные и постоянные токи ФЭУ; $A = 2J_1(\varphi_M)K$ – постоянная прибора на определенной длине волны; $J_1(\varphi_M)$ и, следовательно, $I(\Omega)$ максимальны при $\varphi_M = 105$ град. Практически константа A находится при процедуре калибровки с использованием вместо образца кругового поляризатора ($P=1$). Таким образом, соотношение двух измеренных сигналов $I(\Omega)/I(0)$ определяет величину степени P частично циркулярно поляризованного света.

С одной стороны, степень частично циркулярно-поляризованного света P , измеренная при исследовании спектров МЦПЛ, определяет относительную разницу вкладов ортогональных циркулярно-поляризованных эмиссионных переходов, индуцированных внешним магнитным полем. С другой стороны, степень частичной циркулярной поляризации, измеренная в спектрах МКД, индуцированных магнитным полем, определяет разность ортогональных коэффициентов циркулярно-поляризованного поглощения света, т.е. $P = \frac{1}{2}(\alpha_+ - \alpha_-)l$, где α_{\pm} – коэффициенты поглощения ортогональных компонент света с круговой поляризацией, l – толщина образца. В настоящей работе используется модуляцию поляризации света, генерируемую фотоупругим модулятором [7]. Выход схемы подключен к пьезокерамическому преобразователю. В качестве основы для реализации положительной обратной связи используется оптоэлектронную пару, установленную на модуляторе. Для управления фазой колебаний синусоидальный сигнал от оптоэлектронной пары подается на вход схемы активного генератора, подробно рассмотренной в [6,8]. Применение такой электрически изолированной оптической положительной обратной связи позволяет повысить надежность при запуске и работе модулятора [8]. На рис. 1 представлена принципиальная схема магнитооптического устройства измерения МЦПЛ. Важно отметить, что при измерении спектров МКД экспериментальная установка полностью идентична той, что используется для измерения градусных спектров МКД, но здесь вместо Хе-лампы используется галогенная лампа, что более удобно для проведения магнитооптических исследований в видимой области.

В линейной области амперной характеристики ФЭУ существует соотношение между анодным током I_p , световым потоком U и напряжением питания U :

$$I_p = A\Phi \cdot f(U) \quad (4)$$

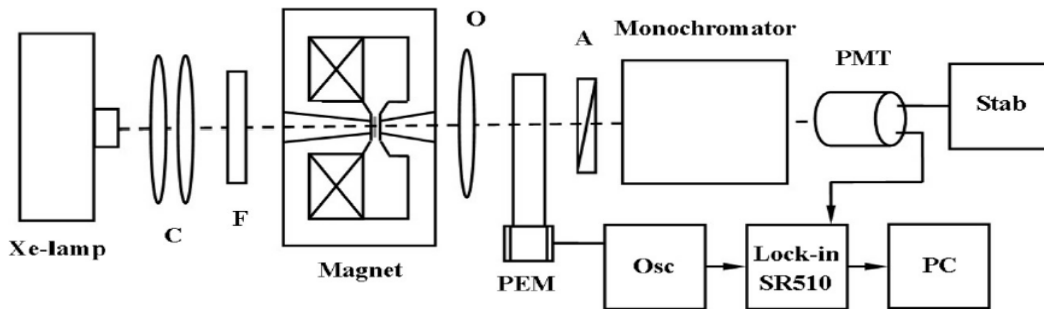


Рис. 1. Принципиальная схема метода измерения степени МЦПЛ. С: Конденсатор, F: УФ-фильтр ZWB-1, O: Объектив, PEM: Фотоупругий модулятор, A: Анализатор, PMT: Фотоэлектронный умножитель, Stab: Источник питания и стабилизатор тока, Osc: Активный осциллятор, PC: Компьютер.

где A – коэффициент пропорциональности; $f(U)$ – нелинейная функция (обычно $f = B \cdot 10^{kU}$, где B и k – коэффициенты пропорциональности), характеризующая чувствительность анода в зависимости от напряжения питания. Используя условие стабилизации среднего тока, т.е. $\Delta I_p = 0$, можно получить:

$$k \cdot \Delta U = \frac{\Delta \Phi}{\Phi} = KD \quad (5)$$

где D – оптическая плотность образца, K – масштабный коэффициент [10]. Другими словами, в этом режиме изменение напряжения питания ΔU соответствует дробному изменению освещенности ФЭУ $\frac{\Delta \Phi}{\Phi}$, вызванному светопоглощением образца. Масштабный коэффициент K можно найти при процедуре калибровки спектрофотометра с использованием градуированных оптических фильтров с известными коэффициентами поглощения.

Анализ материала и результаты исследования. Магнитная циркулярно-поляризованная люминесценция, т.е. циркулярная анизотропия спектров излучения в магнитном поле, обусловленная поляризацией зеемановских компонент линий люминесценции [5,7,11,12], является новым и перспективным направлением магнитооптических исследований парамагнитных редкоземельных (РЗ) кристаллов. Это позволяет получить подробную информацию как о волновых функциях, так и об энергетическом спектре магнитоактивных ионов в кристаллах РЗ, поскольку особенности МЦПЛ в значительной степени определяются зеемановским и штарковским расщеплениями электронных состояний РЗ-иона. Предположим, что форма контура линии люминесценции гауссова. Тогда интенсивность (световой поток) линии равна:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{(v-v_0)^2}{2\Gamma^2}} \quad (6)$$

где v – волновое число света (в см^{-1}), v_0 – волновое число в центре эмиссионного перехода, Φ_0 – константа, Γ – полуширина линии при $\Phi = \Phi_0/e$ люминесценции. Используя выражение (9), из (2) можно получить:

$$P = \frac{\Delta \Phi}{2\Phi} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta \Phi_0}{\Phi_0} + \frac{(v-v_0)}{2\Gamma^2} \Delta v_0 \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu_g}{kT} + -\frac{(v-v_0)}{2\Gamma^2} \mu \right] B \quad (7)$$

Где $\Delta \Phi = \Phi_+ - \Phi_-$ – разность интенсивностей право- и левоциркулярно поляризованных компонент света, индуцированная действием внешнего магнитного поля B ; $\Phi = (\Phi_+ + \Phi_-)/2$ – интенсивность неполяризованного света.

Будем считать, что дробное изменение интенсивности $\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0}$ и изменение $\Delta\nu_0 = \left(\frac{d\nu_0}{dB}\right)\Delta B$ переходного волнового числа m_0 излучающего света в (10) связаны с действием внешнего продольного поля на атомной системе, взаимодействующее с циркулярно поляризованным светом. Следовательно, $\mu = \frac{dE}{dB} = g\mu_B$ и $\mu_g = \frac{dE'}{dB} = g'\mu_B$, где g и g' - g -факторы, а $\mu_B = \frac{0.467 \text{ cm}^{-1}}{T}$ - магнетон Бора, дают магнитные моменты соответствующих электронных состояний магнитоактивного иона, связанных с эмиссионным переходом.

Недавно разработанный спектрометр был разработан и использован для исследования степени МЦПЛ и спектров люминесценции кристалла $\text{Ho}_{0.2}\text{Y}_{2.8}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (HoYAG), ориентированного в кристаллографической плоскости (110). Спектры степени МЦПЛ измерены в режиме постоянного тока фотоумножителя. А спектры люминесценции измерялись с использованием модуляции интенсивности с частотой 1 кГц в режиме постоянного напряжения фотоумножителя. На рис. 3 представлен фрагмент спектров люминесценции и степени МЦПЛ HoYAG, измеренных при температуре $T = 85 \text{ K}$ (для МЦПЛ в магнитном поле 0,5 Тл) в «зеленой» полосе люминесценции HoYAG, связанной с эмиссионным $4f \rightarrow 4f$ переходом $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$. Сравнение степени МЦПЛ и спектров люминесценции показывает, что данную особенность магнитополяризованной люминесценции можно аппроксимировать наклонной линейной зависимостью в пределах соответствующей линии люминесценции при 18296 cm^{-1} со сменой знака эффекта на соответствующих линиях свечения. Поэтому особенность спектральной зависимости степени МЦПЛ для этой линии характерна для "диамагнитного" А-члена степени МЦПЛ R3-иона [11].

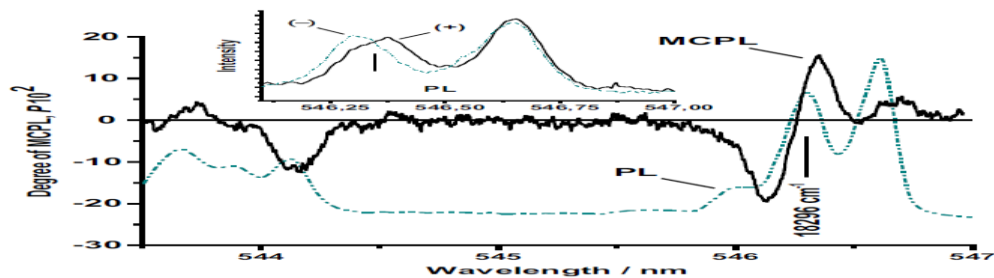


Рис. 3. Сравнение спектров степени Р МЦПЛ (сплошные линии) со спектрами люминесценции (штрихпунктирные линии), измеренными в полосе излучения $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ в $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ при 85 К во внешнем поле $H = 0,5 \text{ Тл}$, параллельном кристаллографической ось [110]. На вставке: Спектральные зависимости правой (сплошная линия) и левой (штрихпунктирная линия) циркулярно-поляризованных компонент эмиссионной линии 18296 cm^{-1} полосы $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ при 85 К в поле 0,5 Тл, ориентированной вдоль ось [110] кристалла $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$.

Ввиду того, что А-терм связан с зеемановским расщеплением дублетного состояния при эмиссионном переходе между синглетным состоянием и дублетными уровнями [11,12], мы можем определить величину дублетного магнитного расщепления $\Delta E = \mu H$ из формулы экспериментальные данные (см. вставку к рис. 3), используя следующее выражение, полученное из (10):

$$\mu B = 2\left(\frac{\Delta P}{\Delta\nu}\right)\Gamma^2 \approx 1.85 \text{ sm}^{-1} \quad (8)$$

Где $\Gamma \approx 5.2 \text{ sm}^{-1}$ – полуширина линии люминесценции при 18296 cm^{-1} ; $2\frac{\Delta P}{\Delta\nu} = 670 \text{ sm}^{-1}$ – удвоенная величина наклона линейной спектральной зависимости степени МЦПЛ во внешнем поле 0,5 Тл. При этом величина зеемановского расщепления, измеренная непосредственно на эмиссионной линии на длине волны 18296 cm^{-1} равна $2,1 \text{ cm}^{-1}$ при 0,5 Тл, что хорошо согласуется с результатами магнитного расщепления, определенными с использованием не только традиционной зеемановской спектроскопии, но и методов современной модуляционной спектроскопии [3–9,11,12].

Выводы. В настоящей работе разработан и создан магнитооптический спектрометр, основанный на модуляции поляризации света, создаваемой фотоупругим модулятором оригинальной конструкции. Кроме того, электромагнит с секционным сердечником Е-образной формы был разработан как для продольной, так и для поперечной геометрии, а также для геометрии передачи и отражения. Магнит обеспечивает поле до 1,2 Тл при комнатной температуре и 0,7 Тл при использовании криостата (в диапазоне температур 20–300 К). Разработанный спектрометр апробирован для исследования степени МЦПЛ и спектров люминесценции монокристалла HoYAG в «зеленой» полосе люминесценции, связанной с эмиссионным $4f \rightarrow 4f$ переходом $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ при $T=85 \text{ K}$. Получены значения зеемановское расщепление на эмиссионной линии 18296 cm^{-1} (546,3 нм), измеренное двумя разными методами, равно 1,85 и 2,1 cm^{-1} , что хорошо согласуется с предыдущими измерениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.C. Sutherland, L.E. Vickery, M.P. Klein, Rev. Sci. Instrum. 45 (1974) 1089.
2. T. Ishibashi, Zh. Kuang, Sh. Yufune. J. Appl. Phys. 100 (2006) 093903.
3. B.C. Cavenett, G. Sowersby, J. Phys. E: Sci. Instrum. 8 (1975) 365.
4. K. Sato, H. Hongu, H. Ikekame, Y. Tosaka, M. Watanabe, K. Takanashi, H. Fujimori, Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 989.
5. J. Badoz, M. Billardon, J.C. Canit, M.F. Russel, J. Optics 8 (1977) 373.
6. S.N. Jaspersen, S.E. Schnatterly, Rev. Sci. Instrum. 40 (1969) 761.
7. F.S. Richardson, J.P. Riehl, Chem. Rev. 77 (1977) 773.
8. U.V. Valiev, T. Asilov, R.A. Salyukov, Instrum. Exp. Tech. 37 (1994) 449.
9. M. Cardona, Modulation Spectroscopy: Supplement 11 to Solid State Physics, Academic Press Inc., New York, 1969, pp. 110–112.
10. U.V. Valiev, D.R. Dzuraev, E.E. Malyshev. Opt. Spectrosc. 86 (1999) 703.

11. V.O. Pelenovich, U.V. Valiev, L. Zhou, I. A. Ivanov, O.V. Pelenovich, U.R. Rustomov, D. Fu. Magneto-optical spectrometer based on photoelastic modulator with optical feedback and its application in study of f-electron materials // *Optical Materials*, 2016, 55, pp. 115–120
12. У.В. Валиев, У.Р. Рустамов, Б.Ю. Соколов. Управляемая магнитным полем поляризованная люминесценция гранатов $Y_3Al_5O_{12}-Tb$ и $Y_3Al_5O_{12}-Ho$. // *Физика твердого тела*, 2002, Т.44, с. 269-271.