

ФТТ-2007

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

Международной научной конференции

23–26 октября 2007 г., Минск

Том 1

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
И ПОЛУПРОВОДНИКОВ НАН БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ФТТ-2007

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
Международной научной конференции
23–26 октября 2007 г., Минск

В трех томах

Том 1

Минск
«Издательский центр БГУ»
2007

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МНИМОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИТТРИЕВОГО ФЕРРОГРАНАТА

В.Р.Соболь^{1,2}, Н.А.Каланда², С.М.Арабей³, Т.В.Волчик¹, О.Н.Мазуренко², И.И.Макоед⁴
¹БГАТУ, ²ОИФТТП НАН Беларуси, ³ИМАФ НАН Беларуси, ⁴БрГУ им. А.С.Пушкина

Изучение оптических характеристик материалов по существу означает установление закономерностей спектрального поведения показателя преломления, который в свою очередь определяется видом частотной зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости. Выявление и уточнение оптических характеристик как новых, вновь синтезированных, так и уже известных материалов позволяет находить новые специфические свойства этих материалов и расширить тем самым область их практического применения на основе тех или других оптических эффектов. Так, в устройствах оптической записи и считывания информации обычно используются такие свойства материалов, которые способны изменять характеристики света, например, состояние поляризации при прохождении через оптический слой (эффект Фарадея) или при отражении от его поверхности (эффект Керра). К числу материалов обладающих выраженным эффектом Фарадея и Керра относятся железоиттриевый феррит гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$) и его производные в виде частично замещенных твердых растворов [1, 2]. Существенно, что для успешного функционирования устройств в режиме пропускания света требуется, чтобы материал удовлетворял как условиям магнитооптической активности, так и условиям высокой прозрачности, т.е. в комплексе обладал оптической добротностью.

В настоящей работе изучены спектральные особенности оптических характеристик, определяющих пропускание и поглощение света нелегированным иттриевым феррогранатом, как основы для новых примесных магнитооптических материалов. Обоснованность такого исследования зиждется на том, что замещенные (например, висмутом) твердые растворы такого граната не являются в термодинамическом смысле более равновесными, чем сам базовый материал. Важно отметить, что присутствие ионов примеси (висмута) на позициях иттрия с одной стороны увеличивает константу Фарадея, а с другой – приводит к возрастанию внутренних напряжений, т.е. дефектности кристаллической структуры. В этом смысле важно составить общее представление о спектральных особенностях оптических характеристик данного материала и их изменениях при легировании, с целью управления его свойствами в процессе изготовления.

Следует отметить, что в современном материаловедении и микроэлектронном производстве все большее распространение приобретают тонкие пленки, которые технологичнее в изготовлении и практичнее в эксплуатации по сравнению с микроэлементами, полученными путем разделения объемных заготовок высокого качества. Перспективы повышения качества замещенных растворов в виде пленочных структур можно оценить, сопоставляя их оптические свойства со свойствами объемного образца исходного материала. Кроме этого, литературное многообразие данных по оптическим и другим свойствам $Y_3Fe_5O_{12}$ не всегда однозначно. По всей видимости, это обусловлено неидентичностью и сложностью применяемых методик синтеза, а также разнообразием экспериментальных подходов по тестированию и расшифровке их оптических спектров. Представленные в настоящей работе экспериментальные результаты изучения оптических свойств монокристаллического железоиттриевого граната в виде объемных и пленочных образцов, позволили, на основе численного моделирования спектров поглощения, рассчитать мнимую составляющую показателя преломления образцов.

Объемные цилиндрические образцы длиной и диаметром около 2 мм были синтезированы методом направленной динамической кристаллизации, а пленочные структуры толщиной 75 мкм – методом жидкофазной эпитаксии на монокристаллических подложках из галлий гадолиниевого граната (ГГГ). Оптические спектры поглощения (диапазон длин волн 300–2000 нм) приготовленных образцов измерялись на спектрофотометре Cary-500 Scan (Varian, США) в виде спектральной зависимости оптической плотности D – натурального логарифма отношения интенсивностей падающего I_0 и прошедшего I излучения через образец.

На рис.1. представлены спектры поглощения объемного и пленочного образцов $Y_3Fe_5O_{12}$, а также подложки из ГГГ, используемой для нанесения пленки. Согласно литературным данным [2], спектральная область прозрачности (граничные значения длин волн, при которых интенсивность прошедшего света I меньше интенсивности падающего I_0 в e раз) исследуемых образцов $Y_3Fe_5O_{12}$ условно разделена на две области: первая – 0.9–6 мкм,

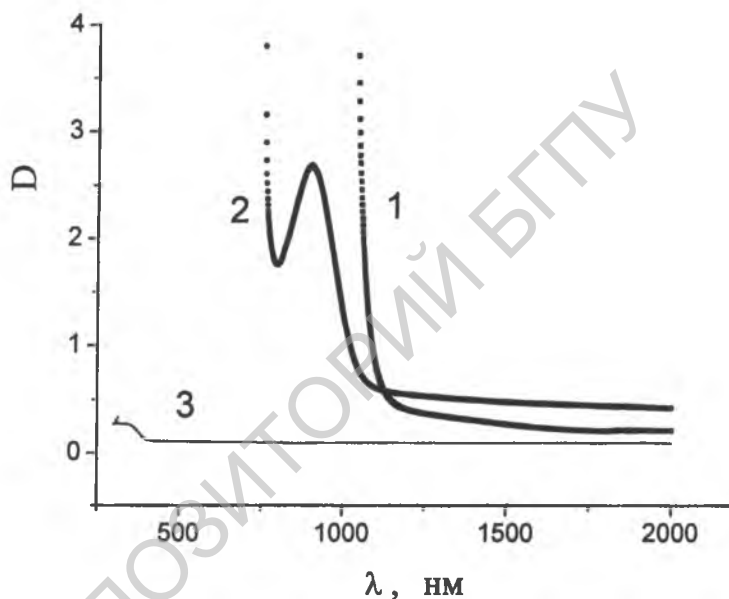


Рис. 1. Спектры поглощения иттриевого феррограната: 1 – объемный образец толщиной 2 мм, 2 – пленочная структура толщиной 75 мкм на подложке ГГГ, 3 – подложка ГГГ.

вторая – свыше 100 мкм. Анализ спектров показывает, что в красной части (800 – 2000 нм) первой области прозрачности оптическая плотность объемных образцов весьма мала (рис.1, кривая 1) и приближается к оптической плотности галлий гадолиниевого граната (кривая 3). Пленочная же структура $Y_3Fe_5O_{12}$ пропускает свет в этой области хуже (кривая 2), поскольку в ней возможно присутствие большого количества дефектов, и кроме того появляется дополнительная граница раздела, приводящая к увеличению отражения. Таким образом, начиная с $\lambda \geq 1100$ нм пленка иттриевого феррограната уступает по прозрачности объемному образцу. Спектры показывают, что для исследуемой пленочной структуры граница области прозрачности начинается с $\lambda = 1000$ нм, а для объемного образца – с $\lambda = 1100$ нм. В спектральной области с $\lambda \leq 1100$ нм оптическая плотность пленки меньше чем объемного

образца, т.е. роль дополнительной поверхности раздела в пленочной структуре уже несущественна из-за возрастающего вклада эффекта толщины объемного образца.

Сопоставление спектров объемного и пленочного образцов $Y_3Fe_5O_{12}$ показывает, что увеличение поглощения света в диапазоне 800 – 1100 нм в объемном материале обусловлено преимущественно ростом коэффициента поглощения света, а влияние вещественной части показателя преломления незначительно. Для объемного образца в приближении традиционных подходов анализа на основании закона Бугера легко показать, что выполняются следующие соотношения, связывающие коэффициент отражения R с толщиной образца d и оптической плотностью $D = \ln(I_0/I)$, вещественной (n) и мнимой (k) компонентами показателя преломления

$$\ln \frac{I_0}{I} = -2 \ln \left(\frac{4n}{n^2 + 2n + 1 + k^2} \right) + \frac{4\pi k d}{\lambda} \quad (1)$$

Отношение интенсивности прошедшего к интенсивности падающего света для случая пленочной структуры удовлетворяет следующему соотношению

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4n}{n^2 + 2n + 1 + k^2} \frac{4(nn' + kk')}{n + 2nn' + n'^2 + k^2 + 2kk' + k'^2} \frac{4n'}{n^2 + 2n'k' + 1 + k'^2} \exp \left(-\frac{4\pi}{\lambda} (kd + k'd') \right) \quad (2)$$

где n , n' и k , k' вещественные и мнимые компоненты показателя преломления материала пленочного образца и подложки, которые имеют толщины d и d' соответственно.

Сопоставление полученных соотношений с результатами эксперимента при $\lambda=2000$ нм показывает, что выражение для оптической плотности объемного образца (1) может быть удовлетворено, если последнее слагаемое в нем вида $4\pi k d / \lambda$, имеющее в этой области величина $4000 \pi k$, будет пренебрежимо мало. Действительно, подстановка пробного значения $n \approx 2$ приводит к выражению $\ln(I_0/I) = -2 \ln(8/9) + 2 \ln(1 + k^2/9) + 4000 \pi k$, которое удовлетворяет эксперименту ($D = 0.2$), если $k < 0.2/4000 \pi$. Если же предположить, что вклад в оптическую плотность формируется за счет мнимой составляющей при $n=1$, то получаем следующее выражение $\ln \frac{I_0}{I} = 2 \ln \left(1 + \frac{k^2}{4} \right) + 4000 \pi k$. Видно, что последнему

выражению можно удовлетворить, если второе слагаемое будет порядка зарегистрированной величины $D=0.2$, что означает опять таки прежний предел для k .

Для пленочного образца выражение оптической плотности усложняется из-за наличия дополнительной границы раздела и возможного поглощения в материале ГГГ-подложки. Для расчета мнимой составляющей k принималось во внимание в соответствии с данными литературы, что вещественная часть $n(\lambda=1310 \text{ нм}) = 2.2$, $n(\lambda=1550 \text{ нм}) = 2.19$, то есть, по сути, является весьма слабой линейной функцией длины волны. Постулируя такой ход зависимости во всем исследуемом диапазоне и используя соотношения (1) и (2) путем моделирования спектральной зависимости поглощения отыскивались значения k , которые представлены на рис. 2.

Из полученных данных (Рис. 2, кривая 1) следует, что значение показателя преломления в области 1.1–2 мкм спектра действительно формируется только частичным отражением на передней и задней граней исследуемого образца. Для верификации результатов расчета в коротковолновой области ($\lambda \leq 1.1$ мкм) следует более тщательно проанализировать возможное влияние вещественной составляющей показателя преломления.

Это следует из того, что при формальном уменьшении n в область значений меньше единицы, с последующим устремлением его к нулю, можно достичь любых значений оптической плотности, вплоть до бесконечности при сохранении малости мнимой компоненты. Такое поведение напоминало бы ситуацию, которая реализуется в металлах, у которых в области частот ниже частоты плазменных колебаний показатель преломления становится мнимой величиной.

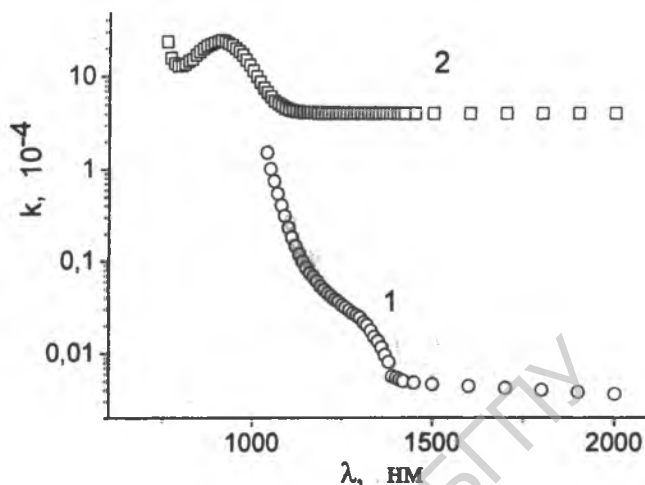


Рис. 2. Изменение мнимой составляющей показателя преломления $Y_3Fe_5O_{12}$ в области его спектральной прозрачности: 1 – объемный образец, 2 – пленочный образец.

Естественно, что для повышения точности обработки результатов по представленной методике, целесообразно применять образцы с наиболее малым уровнем поглощения, которое можно реализовать либо за счет малости мнимой составляющей k , либо за счет малости толщины образца при конечном значении мнимой компоненты показателя преломления. Это подтверждается данными по оптической плотности пленочных структур, у которых область прозрачности сдвинута в фиолетовую часть исследуемого диапазона длин волн в большей степени, чем у объемного образца. Во всяком случае, при анализе оптической плотности при пренебрежимо малом поглощении за счет толщины возникает больше свободы для установления истинного значения как вещественной, так и мнимой компоненты показателя преломления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Г.С.Кринчик, М.В.Четкин. Прозрачные ферромагнетики. УФН, **98**, 1, 3 (1969)
- [2]. The Optical Properties of $(Y_{1-x}Gd_x)_{3-z}(Al_{1-y}Ga_y)5O_{12}:Ce_z$ Phosphors Bull. Korean Chem. Soc. Vol. **23**, 10, 1435 (2002).