

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МНИМОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИТТРИЕВОГО ФЕРРОГРАНАТА

В.Р.Соболь<sup>1,2</sup>, Н.А.Каланда<sup>2</sup>, С.М.Арабей<sup>3</sup>, Т.В.Волчик<sup>1</sup>, О.Н.Мазуренко<sup>2</sup>, И.И.Макоед<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>БГАТУ, <sup>2</sup>ОИФТТП НАН Беларуси, <sup>3</sup>ИМАФ НАН Беларуси, <sup>4</sup>БрГУ 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,

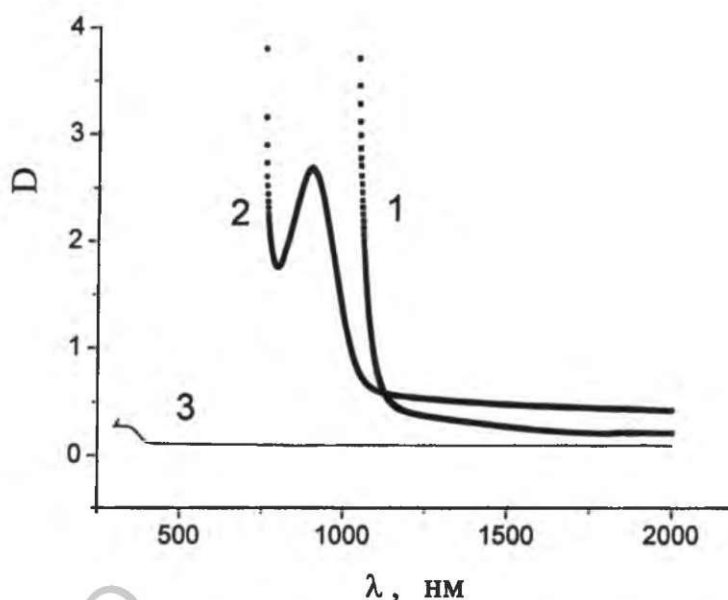


Рис. 1. Спектры поглощения иттриевого феррограната: 1 – объемный образец толщиной 2 мм, 2 – пленочная структура толщиной 75 мкм на подложке ГГГ, 3 – подложка ГГГ.

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

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

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  $4\pi kd/\lambda$ , 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 ГГТ-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 гранях 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.

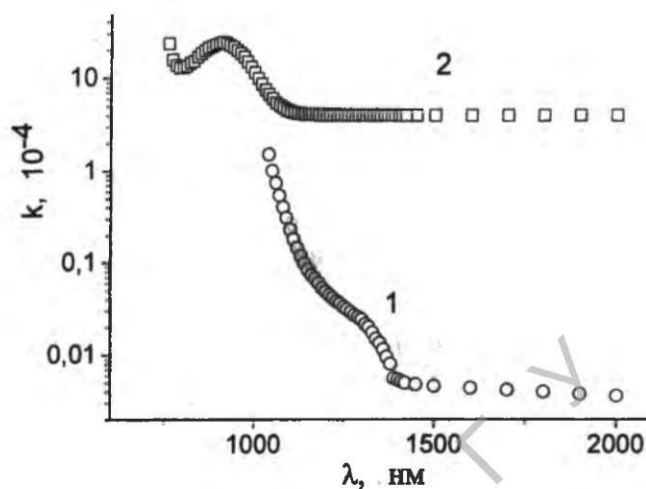


Рис. 2. Изменение мнимой составляющей показателя преломления  $Y_3Fe_5O_{12}$  в области его спектральной прозрачности: 1 – объемный образец, 2 – пленочный образец.

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).