

# ФОТОУПРУГАЯ И РОСТОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ

Очилов О. Email: Ochilov637@scientifictext.ru

Очилов Одил - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
ООО «Центр микроэлектроники и специальной техники»,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

**Аннотация:** изучен тензор диэлектрической проницаемости в многокомпонентных редкоземельных ферритах-гранатах (РЗФГ). Определены ее вклады, связанные с неоднородностью состава по толщине и с нестатистическим распределением ионов разных размеров по кристаллографическим позициям, определен вид тензора  $\varepsilon_{ij}^c$  в области окна прозрачности гранатов с учетом деформаций и ростовой анизотропии кристалла.

Рассмотрены по отдельности эффекты оптической анизотропии, возникающие при распространении света в эпитаксиальных пленках РЗФГ вследствие спонтанной намагниченности, несоответствия постоянных решеток пленки и подложки, неоднородности кристаллической структуры по толщине пленки.

**Ключевые слова:** редкоземельные ферриты-гранаты, эпитаксиальные пленки, кристаллическая структура, фотоупругая и ростовая анизотропия, тензор диэлектрической проницаемости.

## PHOTOELASTIC AND GROWTH OPTICAL ANISOTROPY OF EPITAXIAL FILMS OF RARE-EARTH FERRITE-GARNETS

Ochilov O.

Ochilov Odil - PhD physics-mathematical sciences, Senior Research Associate,  
LTD «CENTER OF MICROELECTRONICS AND SPECIAL EQUIPMENT»,  
TASHKENT, REPUBLIC OF UZBEKISTAN

**Abstract:** it is studied a tensor of dielectric permeability in multicomponent rare-earth ferrite-garnets (REFG). Her deposits connected with heterogeneity of structure on thickness and with not statistical distribution of ions of the different sizes on crystallographic positions are defined, the type of a tensor  $\varepsilon_{ij}^c$  by in the field of a window of transparency of pomegranates taking into account deformations and growth anisotropy of a crystal is determined the effects of optical anisotropy arising at distribution of light in epitaxial films of REFG owing to spontaneous magnetization, discrepancy of constant lattices of a film and a substrate, heterogeneity of crystal structure on film thickness are considered separately.

**Keywords:** rare-earth ferrite of a grenade, epitaxial films, crystal structure, photoelastic and growth anisotropy, tensor of dielectric permeability.

УДК 535.55, 535.012.2

Эпитаксиальные монокристаллические пленки редкоземельных гранатов (РЗФГ) являются материальной базой современных магнитооптических (МО) устройств самого разнообразного назначения: для записи и хранения информации; быстродействующих принтеров; управляемых транспарантов, вентиляей; дефлекторов и переключателей систем интегральной и волоконной оптики; датчиков различных физических полей и т.п.

В связи с этим в настоящей работе остановимся на некоторых проблемах распространения света в тонких пленках РЗФГ с учетом их оптической анизотропии. Рассмотрение этой проблемы особенно актуально с точки зрения практических разработок МО элементов интегральной оптики и систем оптической связи, использующих волноводные свойства пленок РЗФГ [1-3, 190, 320, 193].

### Тензор диэлектрической проницаемости.

Поскольку эпитаксиальные пленки РЗФГ обычно находятся в напряженном состоянии, вызванном рассогласованием параметров решетки и подложки. А также для многокомпонентных РЗФГ [4-6, 839, 56, 955] существует неоднородность состава по толщине, связанная с нестатистическим распределением ионов разных размеров по кристаллографическим позициям, ниже нас будет интересовать вид тензора  $\varepsilon_{ij}^c$  в области окна прозрачности гранатов с учетом деформаций и ростовой анизотропии кристалла [6, 839]. Для компонент тензора  $\varepsilon_{ij}^c$  можно записать

$$\varepsilon_{ij}^c = \varepsilon_0 \delta_{ij} + \varepsilon_0^2 g_{ijkl} M_k M_l - \varepsilon_0^2 \rho_{ijkl} U_{kl} + \varepsilon_0^2 r_{ijkl} \beta_k \beta_l \quad (1)$$

где  $\sqrt{\varepsilon_0} = n_0$  - изотропный показатель преломления граната, не зависящий от магнитного упорядочения;  $g_{ijkl}$ ,  $\rho_{ijkl}$  компоненты тензора; магнитооптической анизотропии, фотоупругости, деформации и ростовой оптической анизотропии соответственно;  $M_k M_l$ , - компоненты вектора  $M$ ,  $\beta_k$ ,  $\beta_l$ ,

(1) - компоненты вектора роста. Рассмотрим по отдельности вклад каждого слагаемого в выражении (1) в анизотропию оптических свойств пленок РЗФГ, выращенных на подложках с плоскостями параллельными кристаллографическим плоскостям  $\{100\}$ ,  $\{111\}$  и  $\{110\}$ . Исследованию магнитного линейного двупреломления (оптическая анизотропия, наведенная намагниченностью) посвящено достаточно большое количество работ, как с точки зрения теории, так и с точки зрения эксперимента. Эти результаты обобщены во множестве обзорных статей, поэтому здесь нет необходимости рассматривать эти проблемы.

#### **Фотоупругость - оптическая анизотропия, наведенная деформацией.**

В процессе эпитаксии, если параметры кристаллических решеток РЗФГ и подложки не совпадают, пленка вырастает деформированной. Рассмотрим, как изменится показатель преломления пленки РЗ вследствие деформаций. Для этого еще раз выпишем фотоупругий вклад в тензор  $\varepsilon_{ij}^c$  в виде:

$$\nabla \varepsilon_0^{\rho} = \varepsilon_0^2 \rho_{ijkl} U_{kl} \quad (2)$$

Вид тензора  $\rho_{ijkl}$  аналогичен виду магнитооптического тензора  $g_{ijkl}$  деформацию  $U_{kl}$  разделим на две части:  $U_{\parallel}$  - относительную деформацию в направлении, параллельном плоскости пленки, и  $U_{\perp}$  (относительную деформацию в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, причем  $U_{\parallel} = (a_{\parallel} - a_0)/a_0$ ;  $U_{\perp} = (a_{\perp} - a_0)/a_0$ , где  $a_{\parallel}$  и  $a_{\perp}$  параметры кристаллической решетки пленки в этих двух направлениях,  $a_0$  - параметр решетки РЗФГ в недеформированном состоянии. Будем считать, что пленка сформирована до полного соответствия размеров элементарных ячеек пленки и подложки вдоль границы их соприкосновения. С макроскопической точки зрения случай деформации пленки близка к деформации пластины при температурном расширении, когда одна из ее неторевых плоскостей закреплена. Напряжения в такой пластине являются однородными напряжениями растяжения (сжатия), лежащими в плоскости пластины. В этом случае для тензора деформации в (2) имеем-

$U_4 = U_5 = U_6 = 0$ , а  $U_2 = U_3 = U_{\parallel}$ . Из условия равенства нулю напряжений, перпендикулярных плоскости пленки, находим связь деформаций  $U_1 = U_{\perp}$  с деформацией в плоскости пленки:  $U_{\perp} = h U_{\parallel}$ , где для трех интересующих нас случаев ориентации кристаллографических осей параметр  $h$  можно записать в виде:

$$h_{100} = (2c_{12} / c_{11}); \quad h_{111} = 2(3c_{12} + \Delta c) / (3c_{11} + \Delta c); \quad h_{110} = (4c_{12} + \Delta c) / (2c_{11} - \Delta c); \quad \Delta c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44} \quad (3)$$

Здесь  $c_{ij}$  - компоненты тензора констант жесткости, связывающего напряжения с деформацией пленки как:  $b_i = c_{ij} U_j$  / Используя явный вид тензоров  $\rho_{ijkl}$  и  $U_{kl}$  матричного уравнения (2) можно найти изменение значения главных показателей преломления пленки РЗФГ, обусловленные фотоупругостью, для трех случаев ориентации плоскостей пленки:

1) Для света, распространяющегося в плоскости пленки, параллельной  $\{100\}$  величина двупреломления определяется как

$$\Delta n = \Delta n_{\parallel} - \Delta n_{\perp} = (1/2) n_0^3 (\rho_{12} - \rho_{11}) (1 + h_{100}) U_{\parallel} \quad (4)$$

где  $\Delta n_{\perp}$  и  $\Delta n_{\parallel}$  изменения показателей преломления для двух линейно поляризованных, световых волн, поляризацией соответственно вдоль и перпендикулярно плоскости пленки. Таким образом, величина двупреломления - не зависит от направления распространения света в плоскости пленки, т.е. кристалл становится оптически одноосным с направлением оптической оси, перпендикулярным плоскости пленки.

2) Для света, распространяющегося в плоскости пленки, параллельной  $\{111\}$  двупреломления имеет вид:

$$\Delta n = n_0^3 \rho_{44} (1 + h_{111}) U_{\parallel} \quad (5)$$

т.е. в этом случае кристалл также становится практически одноосным, причем его оптическая ось перпендикулярна плоскости пленки.

3) Для света, распространяющегося в плоскости пленки параллельной  $\{110\}$  в случае распространения света вдоль направления  $[110]$  двупреломление имеет вид:

$$\Delta n = (\Delta n_1 - \Delta n_2) = n_0^3 \rho_{44} (1 + h_{110}) U_{\parallel} \quad (6)$$

А вдоль направления  $[100]$

$$\Delta n = (\Delta n_1 - \Delta n_3) = (1/2) n_0^3 (\rho_{12} + \Delta \rho / 2 - \rho_{11}) (1 + h_{110}) U_{\parallel} \quad (7)$$

Следовательно, величина двупреломления зависит от направления распространения света, и кристалл из кубического превращается в двуосный.

В заключение этого раздела укажем порядок характерного изменения величины показателя преломления в эпитаксиальных пленках РЗФГ, вызванного деформацией. При относительной деформации  $U_{\parallel} \sim 10^{-4}$ : с использованием типичного значения постоянной решетки граната  $a_0 \sim 12,4 \text{ \AA}$  и показателя преломления в недеформированном состоянии получаем для величины двупреломления  $\Delta n \sim 10^{-4} - 10^{-5}$  (Для сравнения МЛД в РЗФГ при комнатной температуре характеризуется величиной, т.е. сравним с фотоупругим вкладом).

#### **Ростовая оптическая анизотропия**

В соответствии с экспериментальными данными для интерпретации результатов исследований двупреломления в многокомпонентных РЗФГ пленках необходимо принимать во внимания,

индуцированное ростом понижения симметрии кристалла, связанное с различным распределением одноименных ионов по узлам решетки в разных слоях пленки. Подобная стратификация кристаллической структуры пленки приводит к возникновению зависимости ее показателя преломления от координаты, перпендикулярной поверхности пленки. Вклад этого механизма в оптическую анизотропию описывает последнее слагаемое в выражении (1):

$$\Delta \varepsilon^{cr} = r_{ij} \beta_i \beta_j$$

Вид тензора  $r_{ij}$  аналогичен виду магнитооптического и фотоупругого тензоров, рассмотренных выше. Следовательно, воздействие ростовой анизотропии формально аналогично действию одноосного напряжения, направленного перпендикулярно поверхности пленки. То есть появление ростовой анизотропии приведет к дополнительному повороту главных осей тензора диэлектрической проницаемости кристалла относительно фотоупругим и магнитооптическим вкладами в  $\varepsilon_{ij}^e$ , а только изменит величины трех его главных значений. Поэтому для двупреломления, индуцированного с стратификацией кристаллической структуры пленки сразу же можно записать:

1) для пленки, выращенной на подложке с плоскостью, параллельной  $\{100\}$ :  $\Delta n = 1/2 n_0^3 (r_{11} - r_{12}) 2$

2) для пленки, выращенной на подложке с плоскостью, параллельной  $\{111\}$ :

ной  $\{111\}$ :  $\Delta n = (1/2) n_0^3 r_{44}$

3) для пленки, выращенной на подложке с плоскостью, параллельной  $\{110\}$ :  $\Delta n = 1/2 n_0^3 r_{44}$  при распространении света вдоль оси  $[110]$  и  $\Delta n = (1/4) n_0^3 (r_{11} - r_{12} + r_{44})$  - при распространении света вдоль оси  $[110]$ .

Заметим, что вклад ростовой анизотропии в изменении показателя преломления кристалла обычно трудно экспериментально отделить от фотоупругого вклада. Однако, теоретические оценки показывают, для реальных пленок многокомпонентных РЗФГ величина двупреломления, связанного с нестатистическим распределением различных ионов по толщине пленки может достигать  $10^{-6}$ .

#### **Заключение**

Мы рассмотрели по отдельности эффекты оптической анизотропии, возникающие при распространении света в эпитаксиальных пленках РЗФГ вследствие спонтанной намагниченности, несоответствия постоянных решеток пленки и подложки, неоднородности кристаллической структуры по толщине пленки. При этом мы не касались вопроса, связанного с взаимозависимостью этих вкладов в тензор диэлектрической проницаемости кристалла  $\varepsilon_{ij}^e$ . Так спонтанная намагниченность всегда вызывает деформации кристаллической решетки, обусловленные магнитострикцией, а имеющиеся в кристалле упругие напряжения изменяют энергию магнитоупругого взаимодействия и, как следствие - ориентацию спонтанной намагниченности.

#### **Список литературы / References**

1. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М. Наука, 1988. 190 с.
2. Рондошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.. Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
3. Чани В.И. Эмпирическое правило распределения компонентов при кристаллизации сложных феррогранатов в раствор-расплавах // ЖТФ, 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 193-196.
4. Рондошкин В.В., Чани В.И., Цветкова А.А. Коэффициенты распределения редкоземельных элементов при кристаллизации феррит-гранатов // Письма в ЖТФ, 1987. Т. 13. Вып. 4. С. 839-842.
5. Очиллов О., Асильов Т., Кучкарова Ф.М. Методические аспекты исследования температурной зависимости оптического линейного двупреломления Узбекский физический журнал, 1994. № 2. С. 56-59.
6. Ochilov O. Optical anisotropy of iron garnets with growing anisotropy Tr.J. of physics, 1998. 22. С. 955-970.