

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ МОЛИБДАТА ГАДОЛИНИЯ С ПРИМЕСЬЮ НЕОДИМА

А.Н. Брызгалов, Н.Ф. Кабилов, К.Ф. Ахметшин

Представлены результаты исследования изменения диэлектрических свойств, тангенса потерь и доменной структуры кристаллов ГМО с примесью неодима под внешним воздействием на кристаллы. Определена зависимость положения границ доменов от действия электрического поля, которые образуют дифракционную решетку с переменным периодом.

Ключевые слова: кристаллы, молибдат гадолия (ГМО), неодим, домены.

Одной из проблем современной оптоэлектроники является определение возможностей для модуляции и сканирования лазерного излучения с помощью сегнетоэлектрических кристаллов [1]. Определено несколько перспективных кристаллов, в том числе PMN ($\text{Pb}_3\text{MgNb}_2\text{O}_3$). Имеются предположения, что с этой целью можно использовать кристаллы молибдата гадолия с примесью р.з.э. (редкоземельные элементы). Кристаллы с управляемым значением показателя и растянутым во времени переходом в другую фазу дают возможность использовать их для сканирования лазерного излучения.

Кристаллы ГМО относятся к сегнетоэлектрикам-сегнетоэластичкам типа смещения. Низкотемпературная фаза точечной симметрии C_v - $mm2$ ромбопирамидального класса с параметрами элементарной ячейки $a = 1,039 \text{ \AA}$; $b = 1,042 \text{ \AA}$; $c = 1,070 \text{ \AA}$ и элементами симметрии L_22P . Высокотемпературная фаза D_{2d} - $2m$ тетрагонально-скаленоэдрического класса с элементами симметрии L_42L_2P [2]. С переходом в высокотемпературную фазу объем ячейки удваивается. Температура перехода для кристалла ГМО без примеси неодима составляет $\sim 159 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

В работе [4] приведены результаты исследования кристаллов ГМО с примесями неодима $\text{Gd}_{1-x}\text{Nd}_x(\text{MoO}_4)_3$ концентрации ~ 10 и 15 вес. %. Использовались образцы среза (001) и (100), вырезанные перпендикулярно и параллельно оси поляризации кристалла. Изменение доменной структуры под воздействием температуры и электрического поля наблюдалось в поляризованном свете, а доменная структура вблизи точки фазового перехода фиксировалась методом гидротермального травления [5].

При комнатной температуре в образце среза (001) проявляется два типа доменов: узкие шириной $\sim 10'' - 10 \text{ см}$ и широкие $\sim 10'' - 10'' \text{ см}$, тогда как на срезе (100) проявляются только широкие домены. Границы доменов прямолинейные и лежат в плоскостях симметрии (110) и (110) [6].

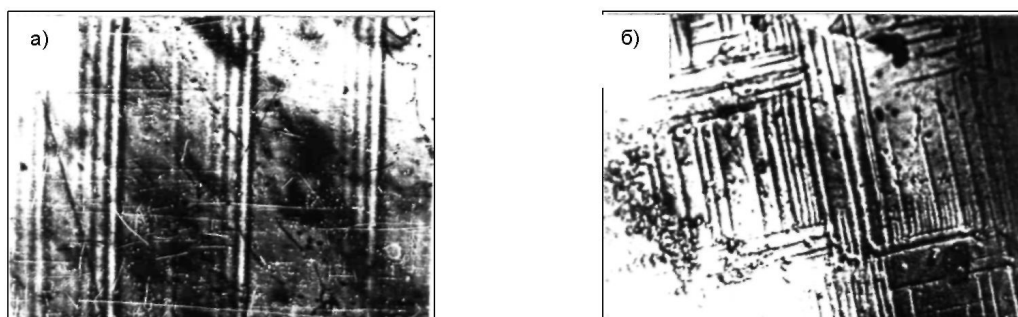


Рис. 1. Доменная структура кристалла ГМО, полученных в поляризованном свете (а) и гидротермальным травлением (б). Срез (001), $\times 200$.

Гидротермальным травлением в растворе NaCO_3 установлено, что границы узких доменов поверхностные глубиной $\sim 0,3-0,5 \text{ мм}$, а границы широких доменов проходят через весь кристалл.

Помимо завершенных границ наблюдаются незавершенные поверхностные границы (рис. 1), которые в работе [7] названы зигзагообразными (ЗОДГ) в отличие от завершенных (ПДГ). В ра-

боте [8] показана возможность управления доменной структурой магнитным полем, но не указано какого типа границы используются объемного или поверхностного.

Результаты исследования

При нагревании кристаллов под действием электрического поля или при механическом воздействии происходит боковое смещение границ доменов, в первую очередь поверхностных, а затем объемных. На участках с максимальной концентрацией примеси смещение границ происходит при более высокой температуре. Экспериментально установлено, что натяжение объемных доменных границ составляет $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Дж/м². Смещение границ доменов начинается при напряженности поля $E \sim 3 \cdot 10^5$ В/м, а заканчивается переходом в монодоменную структуру при $E \sim 14 \cdot 10^5$ В/м, спонтанная поляризация составляет 10^4 В/м.

Определение диэлектрической восприимчивости проводилось с помощью моста Р-НМ при частоте 2,5 кГц с погрешностью $\sim 1,5$ %. Использовался метод сравнения емкости ячеек с кристаллом и без кристалла:

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 S}{d} (\epsilon - 1) \text{ или } \epsilon = 1 + \frac{\Delta C d}{\epsilon_0 S}.$$

Температура фазового перехода с примесями неодима составляет ~ 175 °С вместо 159 °С, причем для кристаллов с большей концентрацией (15 %) значение диэлектрической проницаемости ниже, чем для кристаллов с концентрацией ~ 10 % (рис. 2, а). Достигается максимум в том и другом случаях постепенно и резко падает при температуре фазового перехода. Более длительное время достижения максимума у кристаллов с высокой концентрацией примеси неодима.

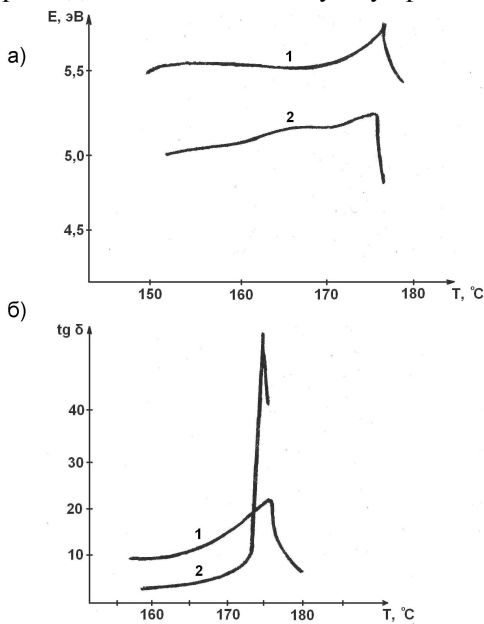


Рис. 2. Изменение диэлектрической проницаемости кристаллов ГМО с примесями неодима (а) и тангенса потерь (б) : концентрации примеси 10% (1) и 15% (2)

Максимум тангенса потерь для кристаллов с большей концентрацией в 2,5 раза выше, чем для кристаллов с меньшей концентрацией. Температура фазового перехода и в этом случае составляет 175 °С (рис. 2, б).

Исследовалась магнитная восприимчивость, которая определяется уравнением Кюри-Вейса с эффективным моментом:

$$\mu_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{3}{N \text{ tg } \alpha}} \approx 4,83 \mu_B,$$

где $N = \frac{2N_A}{\mu}$ - число атомов гадолиния в одном грамме вещества, N_A - число Авогадро, μ - молярная масса ГМО, μ_B - магнетон Бора. С внедрением ионов Nd^{3+} меняется магнитный момент кристаллов.

Для кристаллов с меньшей концентрацией примеси закон Кюри-Вейса соблюдается до 140 °С, а для кристаллов с большей концентрацией - до 150 °С.

Обсуждение результатов

В кристаллах ГМО с примесью неодима проявляются два типа доменов объемные и поверхностные с разными компонентами внутренней деформации: для поверхностных η_1 и для объемных η_2 , причем по экспериментальным данным $\eta_1 < \eta_2$. В таком случае в термодинамический потенциал войдет инвариант $\eta_1 \eta_2 E$ линейный по E , обеспечивающий возможность возникновения спонтанной поляризации [4, 9].

Для термодинамического потенциала имеем

$$\Phi(T, E, \eta_1, \eta_2) = \Phi_0(T) + a'(T - T_0) \cdot (\eta_1^2 + \eta_2^2) + b_1 \cdot (\eta_1^2 + \eta_2^2)^2 + b_2 \eta_1^2 \eta_2^2 - a \eta_1 \eta_2 E - \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2,$$

где $a' = da/dT$, T_0 - температура фазового перехода, a и b_i - постоянные величины, причем $a < 0$ при $T < T_0$, а b_1 и b_2 всегда больше 0 и не зависят от температуры T . Поляризуемость кристалла:

$$P = -\frac{\partial\Phi}{\partial E} = a\eta_1\eta_2 + \varepsilon_0 E a, \quad P_c = a\eta_1\eta_2 = -\frac{aa'(T - T_0)}{4b_1 + b_2} \quad \text{при } E = 0,$$

откуда следует, что поляризуемость кристалла возникает и при $E = 0$:

$$\varepsilon = \frac{\partial P}{\partial E} = \begin{cases} \varepsilon_0 & \text{при } T > T_0, \\ \varepsilon_0 + \frac{a^2}{4b_1 + b_2} & \text{при } T < T_0. \end{cases}$$

Диэлектрическая проницаемость постепенно возрастает с приближением к точке фазового перехода и резко снижается с превышением T_0 . Из двух возможных случаев поляризуемости только первый является сегнетоэлектрическим, связанный с объемными границами, во втором случае $\eta \approx 0$ и $P \approx a\eta_1^2\eta_2^2 \approx 0$, поэтому степень поляризации выражена слабо. Откуда следует, что для тонких кристаллов основной вклад в поляризуемость вносят поверхностные домены, а для толстых - объемные.

В ГМО с активирующей примесью неодима установлена генерация когерентного излучения. Взаимно перпендикулярные границы доменов образуют дифракционную решетку с управляемым переменным параметром d , это открывает возможность применения переменной доменной структуры для управления модулированием лазерного излучения. Дифракционное рассеяние посредством решетки определяется уравнением угла рассеяния

$$G = 1,22 \frac{\lambda}{d}.$$

При этом образуется два взаимно перпендикулярных луча рассеяния с максимальным углом расширения пучка при наибольшей плотности доменов и постепенно убывающим до нуля с переходом к монодоменной структуре.

Переменная диэлектрическая проницаемость $\Delta\varepsilon$ определяет изменение показателя преломления Δn кристаллов в процессе перехода к другой фазе, что дает возможность использовать кристаллы ГМО для сканирования лазерного излучения. Одним из способов применения кристаллов ГМО с примесью неодима для сканирования пучка является использование свойства изменения угла смещения луча $\Delta\beta$ при пропускании излучения через призму с углом при вершине α . Склонение угла $\Delta\beta$, когда луч направлен параллельно основанию призмы, определяется уравнением:

$$\Delta\beta = \frac{2\Delta n \sin(\frac{1}{2}\alpha)}{\cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta)}.$$

Выводы

1. Установлено, что в кристаллах ГМО имеются домены, управляемые внешним воздействием. Определена напряженность электрического поля, при котором начинается смещение границ и переход кристаллов к монодоменному состоянию.

2. Границы доменов образуют дифракционную решетку с переменным периодом, с помощью которой можно управлять лазерным излучением - модулировать. При этом минимальный угол равняется нулю, а максимальный определяется наибольшей плотностью доменов.

3. Примеси неодима в ГМО препятствуют движению границ, что приводит к смещению температуры фазового перехода от 159 °С к 175 °С и увеличению его во времени.

4. С увеличением времени протекания процесса фазового перехода постепенно меняются величины диэлектрической постоянной и показателя преломления. В этом случае открывается возможность использования кристаллов ГМО для сканирования лазерного излучения.

1. Кузьминов, Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением // Ю.С. Кузьминов. - М.: Наука, 1982.
2. Рабинович, А.Э. / А.Э. Рабинович, Л.И. Сафонов // Тезисы докладов на VI Всесоюзной конференции по сегнетоэлектричеству. - Рига: Изд-во ЛатвГУ, 1968.
3. Акустические кристаллы: справочник // М.: Наука, 1982. - С. 426.
4. Брызгалов, А.Н. Физические свойства кристаллов ГМО с примесями неодима / А.Н. Брызгалов, В.В. Мусатов // Материалы итоговой научной конференции ЧГПУ. - 1999. - С. 126-131.
5. Брызгалов, А.Н. Свойства и дефекты оптических кристаллов (кварц, корунд, гранат): автореф. дис. ... д-ра физико-математических наук / А.Н. Брызгалов. - Уфа, 1998. - 32 с.
6. Брызгалов, А.Н. Особенности доменной структуры кристаллов $(Gd_{1-x}Nd_x)_2(MoO_4)_3$ / А.Н. Брызгалов, Б.М. Слепченко, Б.П. Виравчев // Известия высших учебных заведений. Серия «Физика». - Томск: 1989.-№ 11.-С. 111-113.
7. Злоказов, М.В. Взаимодействие зигзагообразной и плоской доменных границ в кристаллах $Gd_2(MoO_4)_3$ в электрическом поле / М.В. Злоказов, Н.А. Тихомирова // Кристаллография. - 1987. - Т. 32. - Вып. 3. - С. 788-791.
8. Федорова, С.А. Влияние магнитного поля на формирование структуры ГМО в области фазового перехода / С.А. Федорова, Н.Л. Цинман // Кристаллография. - 1987. - Т. 3. - Вып. 4. - С. 1047-1048.
9. Струков, Б.А. Сегнетоэлектричество // Б.А. Струков. - М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 23 марта 2009 г.

THE ELECTRO-OPTICAL PROPERTIES OF THE CRYSTALS OF GADOLINIUM MOLYBDATE (GDM) WITH THE NEODYMIUM ADDITION

The article gives the results of research of changes in dielectric properties, tangent of loss and domain structure of GDM crystals with neodymium addition under the influence of external action. The dependence of domain boundaries position upon electric field action is defined. The domain boundaries form a diffraction grating with variable spacing and it enables to control the divergence of radiation. The crystals with controllable value of index and time-expanded transition to another phase can be used for scanning of laser radiation.

Keywords: crystals quartz, non-equilibrium thermodynamics, self-organization, profiling, formation.

Bryzgalov Aleksandr Nikolaevich - Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, General and Theoretical Physics Department, Chelyabinsk State Pedagogical University.

Брызгалов Александр Николаевич - доктор физико-математических наук, профессор, кафедра общей и теоретической физики, Челябинский государственный педагогический университет.

Kabilov Nail Firdasovich - Post-Graduate Student, General and Theoretical Physics Department, Chelyabinsk State Pedagogical University.

Кабилон Наиль Фирдавсович - аспирант, кафедра общей и теоретической физики, Челябинский государственный педагогический университет.

e-mail: nael.kabilov@gmail.com

Akhmetshin Konstantin Flyurovich - Post-Graduate Student, General and Theoretical Physics Department, Chelyabinsk State Pedagogical University.

Ахметшин Константин Флюрович - аспирант, кафедра общей и теоретической физики, Челябинский государственный педагогический университет.

e-mail: axmox@ya.ru