

09

Исследование механизмов управления характеристиками дифракционной решетки, выполненной на поверхности электрооптического кристалла ниобата лития

© В.Д. Паранин

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева
(национальный исследовательский университет),
443086 Самара, Россия
e-mail: vparanin@mail.ru

(Поступило в Редакцию 5 февраля 2014 г.)

Исследованы оптическое пропускание и диаграмма направленности управляемой дифракционной решетки на основе X -среза электрооптического кристалла ниобата лития. Показано снижение интенсивности 0-го и ± 1 -х порядков дифракции до 40% от начального значения для напряжения до 792 В, приложенного к нанесенным на кристалл электродам. Установлено возникновение дифракционных порядков на углах $\pm \lambda/(2d)$ и $\pm 3\lambda/(2d)$. Указанное изменение диаграммы направленности обусловлено возникновением в кристалле рассеивающей фазовой дифракционной решетки под действием электрического поля электродов, исчезающей при отключении напряжения. Отмечена гистерезисная зависимость интенсивности 0-ого дифракционного порядка от напряжения, обусловленная возникновением иглообразных доменов с длиной до $100 \mu\text{m}$ и шириной до $10 \mu\text{m}$, ориентированных перпендикулярно электродам. Показано, что в окрестности доменов существует электрическое поле, вызывающее поворот индикатрисы кристалла, деполяризацию и рассеяние проходящего излучения. Время жизни доменов в нормальных условиях составляет несколько недель при отключенном напряжении и незакорченных электродах.

Введение

Интерес к исследованию свойств электрооптических кристаллов обусловлен высокой функциональностью элементов, выполненных на их основе. Это находит подтверждение в работах [1–4], в которых продемонстрированы электрически управляемые дифракционные оптические элементы (УДОЭ), выполняющие функции модуляторов, дефлекторов, перестраиваемых спектральных фильтров.

Практический интерес представляет кристалл ниобата лития, обладающий хорошей лучевой стойкостью, высоким быстродействием линейного электрооптического эффекта, технологичностью роста и обработки. Ниобат лития является сегнетожестким материалом с коэрцитивным полем до $20\text{--}22 \text{ V}/\mu\text{m}$ и температурой Кюри $\sim 1210^\circ\text{C}$. Это определяет его использование в широком интервале температур и временную стабильность параметров.

Известно [5–8], что приложение электрического поля, сравнимого с коэрцитивным, обуславливает процессы переполяризации электрооптических кристаллов. Кинетика этих процессов определяется структурными свойствами кристалла, напряженностью электрического поля, длительностью его приложения, температурой, освещенностью. Переполяризация изменяет чувствительность показателя преломления кристалла к напряженности поля. Особенно интересны процессы поляризации поверхностного слоя ввиду отличия свойств поверхности и объема ниобата лития [9,10]. Это делает актуальным экспериментальное исследование оптических характеристик УДОЭ, поскольку они образованы

близко расположенными электродами и являются сильнонапряженными элементами.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование оптического пропускания и диаграммы направленности управляемой дифракционной решетки на основе X -среза кристалла ниобата лития, управляемого электрическим полем, сравнимым с коэрцитивным.

Методика подготовки образцов и проведения эксперимента

Использовались кристаллы нелегированного монокристаллического ниобата лития LiNbO_3 конгруэнтного состава размером $15 \times 15 \times 1 \text{ mm}$. Управляемая дифракционная решетка (рис. 1) формировалась на поверхности X -среза кристалла, обладающего максимальной чувствительностью к поперечному полю электродов E_z . Кристаллы полировались алмазной суспензией до чистоты поверхности РП по ГОСТ 11141-84, неплоскостности поверхности — не более $10''$, шероховатости $R_a < 2.0 \text{ nm}$. Период решетки электродов составлял $d = 300 \pm 5 \mu\text{m}$, межэлектродный зазор $a = 140 \pm 5 \mu\text{m}$, длина электродов — 8 mm , ширина области электродов — 12 mm . Структура электродов включала адгезионный слой хрома толщиной 10 nm и проводящий слой меди толщиной 250 nm . Любая пара соседних электродов была подключена к разноименным полюсам источника напряжения. Электроды ориентировались перпендикулярно оптической оси Z кристалла. Электрическая изоляция межэлектродных зазоров обеспечивалась прозрачным акриловым лаком Plastik 70 с электрической прочностью

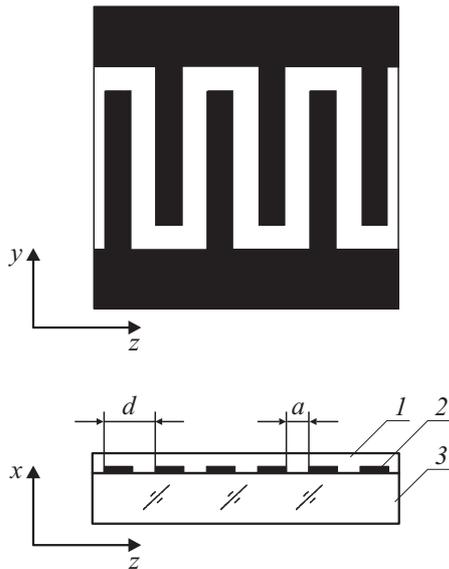


Рис. 1. Управляемая дифракционная решетка: 1 — изоляционный лак, 2 — управляющие электроды, 3 — электрооптический кристалл.

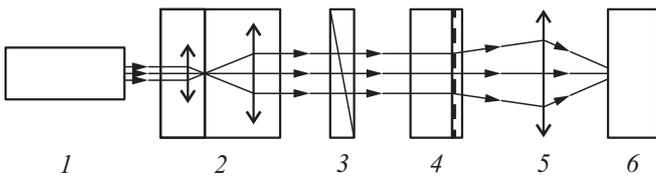


Рис. 2. Оптическая схема измерения: 1 — гелий-неоновый лазер ЛГН-208А, 2 — расширитель пучка и пространственный фильтр, 3 — поляризатор, 4 — УДОЭ, 5 — объектив, 6 — фотоприемник.

до $70 \text{ V}/\mu\text{m}$. Лак наносился аэрозольным методом и формировал гладкий глянцевый слой толщиной $20\text{--}30 \mu\text{m}$ без видимых дефектов. Использование лака предотвращало поверхностный электрический пробой и разрушение электродов при напряжении более 500 V . Высокая электрическая прочность ниобата лития не позволяла развиваться объемному пробую. Электрическое сопротивление образцов составляло не менее $1.5 \text{ G}\Omega$.

Схема измерительной установки приведена на рис. 2. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГН-208А с нестабильностью мощности в рабочем режиме не более $\pm 0.1 \text{ dB}$. Излучение поляризовалось пленочным поляридом. Ось поляризатора ориентировалась параллельно оптической оси Z ниобата лития. Расширенный световой пучок имел гауссово распределение интенсивности с диаметром 2.8 mm по уровню 0.5 и расходимостью не более 0.4 mrad . Плоскость мощности пучка измерялась калиброванным фотоприемником FOD-1202Si и составляла $0.41 \text{ mW}/\text{cm}^2$ в максимуме.

Управление диаграммой направленности УДОЭ производилось аналоговым источником с напряжением до 800 V и пульсациями не более 0.2 V . Напряже-

ние измерялось вольтметром GDM-78251А с пределом измерения 1000 V и основной погрешностью не более 0.012% . Для измерения использовался высокоомный делитель с коэффициентом деления 2.187 , который определялся экспериментально.

Диаграмма направленности регистрировалась ПЗС-камерой DCM310 с разрешением 1024×768 . Зависимость интенсивности 0-го дифракционного порядка от напряжения измерялась фотоприемником FOD-1202Si с диапазоном от -60 до $+5 \text{ dB}$, разрешением 0.1 dB и погрешностью не более $\pm 0.25 \text{ dB}$. Излучение в фотоприемник вводилось через кварцевое оптическое волокно с диаметром сердцевины $62.5 \mu\text{m}$.

Экспериментальные результаты

При отсутствии напряжения в фокальной плоскости УДОЭ присутствуют 0-й и ± 1 -й дифракционные порядки, определяемые дифракцией излучения на периодической амплитудной решетке электродов (рис. 3, а). Увеличение напряжения от 0 до 792 V снижает интенсивности 0-го и ± 1 -х порядков до 40% от начальной. При этом наблюдается появление дифракционных порядков на углах $\pm \lambda/(2d)$, $\pm 3\lambda/(2d)$ (рис. 3, б, с).

Описанные явления объясняются следующим образом. При подаче напряжения в поверхностном слое кристалла формируется электрическое поле с напряженностью E_z , E_x . Период пространственного распределения поля вдоль оси Z равен $2d$, что обусловлено удвоенным периодом распределения потенциалов знакопеременных электродов. В приближении линейного электрооптического эффекта [11] напряженность E_z создает периодическое изменение фазы проходящего Z -поляризованного излучения $\Delta\varphi_z(z)$, равное:

$$\Delta\varphi_z(z) = -\frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \int_0^h E_z(x, z) dx, \quad (1)$$

где n_e — необыкновенный показатель преломления ниобата лития, r_{33} — линейный электрооптический коэффициент, m/V , h — толщина кристалла, m , E_z — напряженность поперечного электрического поля управляющих электродов, V/m .

Следовательно, при включении напряжения в кристалле создается фазовая дифракционная решетка, обусловленная линейным электрооптическим эффектом. Z -поляризованное излучение испытывает дифракционное рассеяние на этой решетке, зависящее от приложенного напряжения. Этому механизму соответствует снижение интенсивностей 0-го и ± 1 -х дифракционных порядков и появление дополнительных порядков на углах $\pm \lambda/(2d)$ и $\pm 3\lambda/(2d)$. При выключении напряжения происходит исчезновение фазовой решетки и гашение дополнительных порядков диффузии.

На рис. 4 показаны зависимости интенсивности нулевого дифракционного порядка от напряжения $I_0(U)$.

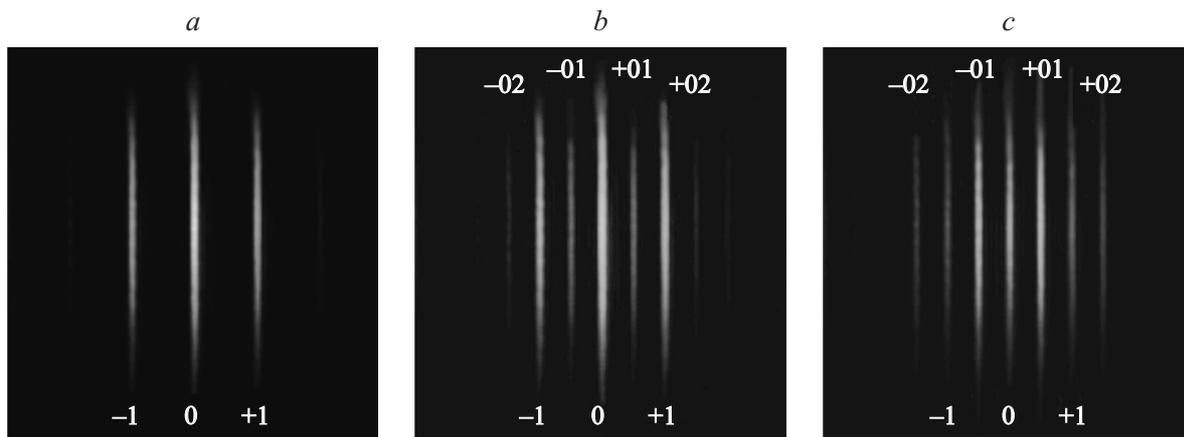


Рис. 3. Диаграммы направленности управляемой дифракционной решетки при различных электрических напряжениях V : a — 0, b — 345, c — 752.

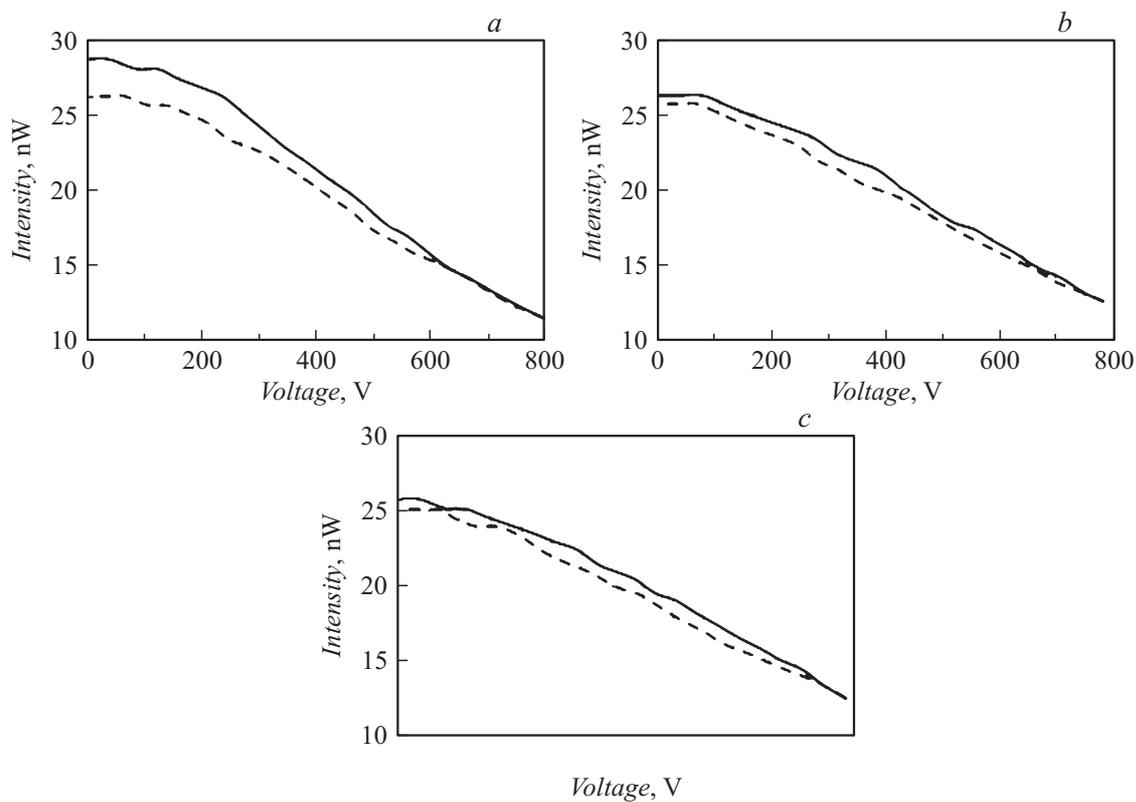


Рис. 4. Зависимость интенсивности нулевого дифракционного порядка от напряжения: a — первый цикл переключения, b — второй цикл переключения, c — третий цикл переключения. Сплошная линия — прямая ветвь модуляционной характеристики, штриховая линия — обратная.

Характеристики на фрагментах a – c снимались последовательно во времени, без перерыва между измерениями.

Ниспадающий вид полученных зависимостей обусловлен формированием в кристалле рассеивающей фазовой дифракционной решетки с удвоенным периодом $2d$, описанной выше. Гистерезисный характер связан с возникновением доменной структуры в поверхностном слое кристалла ниобата лития (рис. 5).

Домены имеют иглообразную форму и ориентированы перпендикулярно электродам. Домены примыкают к электродам с отрицательным потенциалом. Распространение доменов в поле знакопеременных электродов наблюдается преимущественно в одном направлении, что объясняется влиянием внутреннего коэрцитивного поля кристалла, действующего вдоль полярной оси Z . Длина доменов составляет до $100\ \mu\text{m}$, ширина домена —

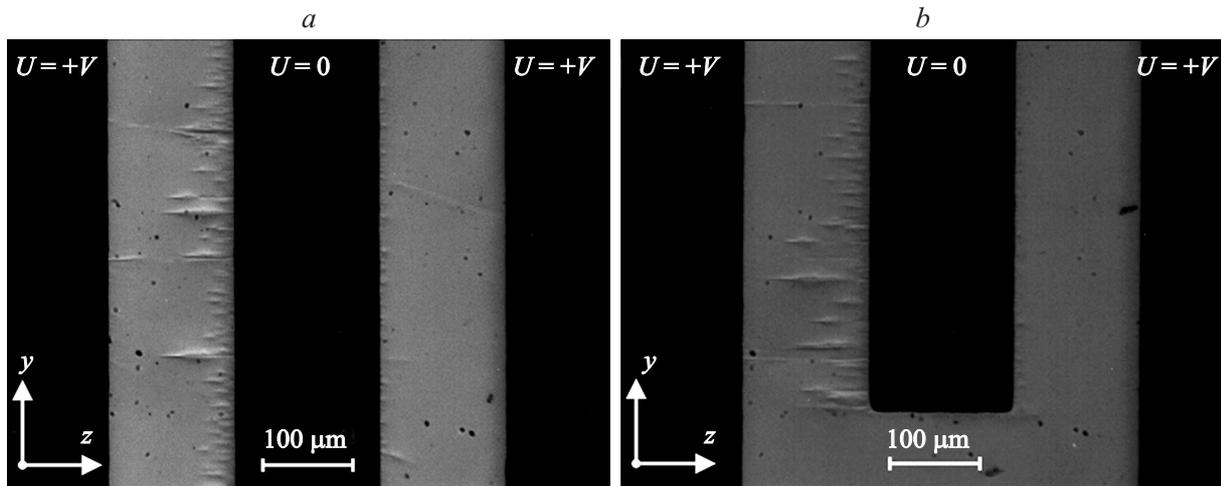


Рис. 5. Доменная структура в поверхностном слое ниобата лития: *a* — домены между электродами, *b* — домены на краях электродов.

до $10 \mu\text{m}$. Вблизи краев электродов наблюдается увеличение размеров доменов (рис. 5, *b*), обусловленное повышенной напряженностью электрического поля у прямоугольных углов. В глубине межэлектродного зазора (рис. 5, *a*) размеры доменов в целом меньше, чем вблизи края. Поперечные размеры и частота расположения доменов обуславливают рассеяние оптического излучения в плоскости XY , что снижает интенсивность 0-ого порядка.

Исследование доменной структуры производилось поляризационно-оптическим методом на микроскопе Биомед-5П. Поляризатор ориентировался параллельно оптической оси Z кристалла. Ось анализатора составляла угол от 5° до 30° с оптической осью кристалла. Наблюдение доменов при такой ориентации поляризатора, кристалла и анализатора означает, что в окрестности доменов существует электрическое поле E_y , параллельное Y -оси кристалла и электродам, которое вызывает поворот оптической оси ниобата лития. Можно утверждать, что поле E_y имеет противоположное направление ниже и выше горизонтальной оси симметрии домена. Именно это обуславливает поворот индикатрисы кристалла в различных направлениях и наличие темной и светлой полос выше и ниже оси домена. Данное утверждение находится в согласии с уравнением индикатрисы для YZ -плоскости ниобата лития, записанной в приближении линейного электрооптического эффекта [11]:

$$\left(\frac{1}{n_0^2} + r_{22}E_y + r_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E_z\right)z^2 + 2yzr_{51}E_y = 1, \quad (2)$$

где n_0 , n_e — обыкновенный и необыкновенный показатели преломления ниобата лития; r_{13} , r_{22} , r_{33} , r_{51} — линейные электрооптические коэффициенты, m/V ; E_y —

напряженность электрического поля в окрестности иглообразного домена, V/m . Появление ненулевой напряженности E_y вызывает поворот индикатрисы на угол θ , равный

$$\Theta = \frac{1}{2} \arctg \left(2r_{51}E_y / \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} + r_{13}E_z + r_{22}E_y - r_{33}E_z \right) \right). \quad (3)$$

Исследование поляризационно-оптическим методом также показало, что домены практически полностью формируются в первом цикле переключения. Это подтверждается и характером зависимостей $I_0(U)$ на рис. 4, где отличие прямой и обратной ветвей максимально для первого цикла переключения. Время жизни доменов, формируемых напряжением до 792 V в течение нескольких минут, составляет до нескольких недель в лабораторных условиях при отключенном напряжении и незакороченных электродах. Нагрев образцов на воздухе при температуре $150\text{--}170^\circ\text{C}$ в течение 10 min полностью устраняет домены.

Из данных рис. 4, 5 следует, что формирование устойчивых иглообразных доменов в поверхностном слое X -среза ниобата лития снижает чувствительность интенсивностей порядков дифракции к управляющему напряжению. Следовательно, влияние доменов на диаграмму направленности и модуляционную характеристику необходимо учитывать при создании электрооптических дифракционных устройств.

Заключение

Исследование управляемой дифракционной решетки на основе X -среза ниобата лития выявило два механизма управления их характеристиками. Первый механизм обусловлен формированием электрическим полем электродов фазовой дифракционной решетки в поверхностном

слое кристалла. Этот механизм вызывает обратимое снижение интенсивности 0-ого и ± 1 -х порядков дифракции и возникновение новых порядков на угловых положениях $\pm\lambda/(2d)$ и $\pm 3\lambda/(2d)$. Второй механизм связан с появлением устойчивых иглообразных доменов в поверхностном слое кристалла, перпендикулярных электродам. В области доменов существует поперечная составляющая электрического поля, вызывающая поворот индикатрисы ниобата лития, деполяризацию и рассеяние излучения. Это обуславливает гистерезисную зависимость интенсивности 0-ого порядка дифракции и снижение чувствительности к напряжению.

Список литературы

- [1] *Ivanenko M. et al.* // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7194. P. 7194-06–7194-10.
- [2] *Shibi K.* // Appl. Opt. 2003. Vol. 42. N 18. P. 3580–3582.
- [3] *Шамрай А.В., Козлов А.С., Ильичев И.В., Петров М.П.* // Квант. электрон. 2005. Т. 35. С. 734–740.
- [4] *Kulishov M.* // Appl. Opt. 1999. Vol. 38. N 36. P. 7356–7363.
- [5] *Кузьминов Ю.С.* Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 264 с.
- [6] *Фрегатов С.О., Шерман А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 6. С. 52–57.
- [7] *Фрегатов С.О., Шерман А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 11. С. 54–58.
- [8] *Залесский В.Г., Шерман А.Б., Фрегатов С.О.* // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 9. С. 1669–1673.
- [9] *Кострицкий С.М., Новомлинцев А.В.* // ФТТ. 1996. Т. 38. № 5. С. 1613–1616.
- [10] *Пономарев Р.С., Сосунов А.В., Бачурихин В.П., Волынцев А.Б.* // Вестн. Пермского ун-та. 2013. Вып. 2(24). С. 67–69.
- [11] *Ярив А., Юх П.* Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.