

Суханов Александр Евгеньевич, студент,  
Кубанский государственный университет,  
г. Краснодар

Галуцкий Валерий Викторович,  
Кандидат физико-математических наук, доцент,  
Кубанский государственный университет,  
г. Краснодар

**МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА  
НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ  
MODEL OF ELECTRO-OPTICAL MODULATOR BASED  
ON GRADIENT LITHIUM NIOBATE CRYSTAL**

**Аннотация:** Рассмотрено влияние концентрационных профилей лития вдоль осей электрооптического модулятора на относительную разность фаз излучения непрерывного лазера.

**Abstract:** The effect of lithium concentration profiles along the axes of an electro-optical modulator on the relative phase difference of cw laser radiation is considered

**Ключевые слова:** электрооптический модулятор, градиентный кристалл, ниобат лития.

**Keywords:** electro-optical modulator, gradient crystal, lithium niobate.

В настоящий момент ниобат лития (НБ) ключевой материал в фотонике, позволяющий применять его в промышленности из-за коммерческой доступности и физических качеств [1]. Из кристалла НБ производятся интегральные оптические устройства – акутооптические, электрооптические модуляторы, нелинейно-оптические преобразователи частот, переключатели.  $\text{LiNbO}_3$  является важным материалом в многих областях науки и технологии, и его свойства продолжают привлекать внимание исследователей и инженеров. Наиболее распространенное применение линейного электрооптического эффекта использовано в модуляторе на основе Маха — Цендера [2]. При прохождении лазерного излучения через ячейку Поккельса (рис. 1), можно изменять интенсивность лазерного излучения, что увеличит температуру внутри кристалла, следовательно изменится фазовая скорость волн внутри кристаллической матрицы.

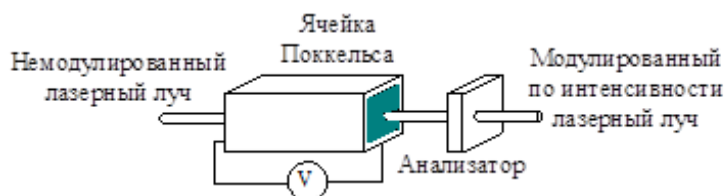


Рисунок 1 – Электрооптический модулятор на основе кристалла ниобата лития.

В работе рассмотрена возможность улучшения разности фаз для необыкновенной и обыкновенной волн за счет использования градиентных нелинейно-оптических сред. Что означает изменение самого состава лития в кристалле в процессе вытягивания, это будет приводить к рассогласованию фазовых скоростей волн, действующих в кристалле ниобата



лития [3], следовательно температурное поле внутри так же будет изменяться из-за вышеописанного поглощения кристаллической матрицы.

Изменение фазы излучения используется в различных областях, связанных с передачей и обработкой сигналов, включая радиосвязь, оптические системы, медицинскую диагностику и терапию, акустические приложения и многие другие [4].

Для исследования влияния градиентного состава и температуры на процесс распространения волн в кристалле ниобата лития был введено выражение для нахождения амплитуды волны в электрооптическом модуляторе с учетом внутреннего поглощения [5]:

$$\frac{dA}{dz} = -0.5\alpha A \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент собственного поглощения кристаллической матрицы для излучений волны накачки соответственно.

$$A_0 = \sqrt{\left(\frac{2\pi I_0 f_1(x,y) f_2(t)}{n_1 c}\right)} \quad (2)$$

- входная амплитуда волны накачки;  $I_0$  - начальная интенсивность для волны накачки;  $f_1(x, y)$  – входное распределение интенсивности излучения лазерной накачки;  $f_2(t)$  – временная функций, значение которой зависят от выбора непрерывной накачки или накачки лазерным импульсом.

Для нахождения распространения температур внутри кристалла необходимо найти локальные интенсивности волны, которые были заданы следующим выражением

$$I(x, y, z, t) = \frac{n}{2\pi} |A(x, y, z, t)|^2 \quad (3)$$

Зададим уравнение теплопроводности, численное решение которого было найдено путем конечных элементов.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \Delta T + q(x, y, z, t) \quad (4)$$

где  $\rho = 4600 \text{ кг/м}^3$ ,  $C = 650 \text{ Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ ,  $K = 4.6 \text{ Вт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$  – плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности ниобата лития [6];  $q(x, y, z, t)$  – функция тепловых источников.

$$q(x, y, z, t) = \alpha I(x, y, z, t) \quad (5)$$

где коэффициент поглощения  $\alpha = 0.002 \text{ см}^{-1}$ , а локальные интенсивность следует брать из формулы (3).

На торцах кристалла теплообмен осуществляется с воздухом, и граничные условия выглядят следующим образом:

$-K \Delta T = h(T - T_0)$ , где  $h = 10 \text{ Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{К}^{-1}$  – коэффициент теплообмена ниобата лития с воздухом при  $T_0 \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для решения уравнения теплопроводности использовались координатная сетка размером  $30 \times 30 \times 20$  точек и 400 точек для дискретизации временного интервала.

Полученные значения температур линейно интерполировались в уравнение (1).



Так как температуры оказывают влияние на изменение показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн соответственно, то значения температур, полученные из численного решения, так же были интерполированы в следующее выражение:

$$\Delta\varphi(x, y, z, t) = \frac{2\pi(n_e(x, y, z, t) - n_o(x, y, z, t))}{\lambda} x \quad (6)$$

где  $n_e(x, y, z, t)$  и  $n_o(x, y, z, t)$  необыкновенный и обыкновенный показатель преломления света,  $\lambda$  – длина волны,  $x$  – длина кристалла.

В связи с тем, что распространения волны в кристалле будет зависеть не только от температуры, но и от показателя преломления, и состава [3]. Данная зависимость будет обусловлена влиянием рассогласованной кривой фазовых скоростей внутри кристалла. Рассмотрим несколько концентрационных распределений в кристалле ниобата лития относительно его постоянного состава, где средняя концентрация лития составляет 49.9916 мол.%. С условием выше написанного получим распределения по всей длине кристалла рис. 2.

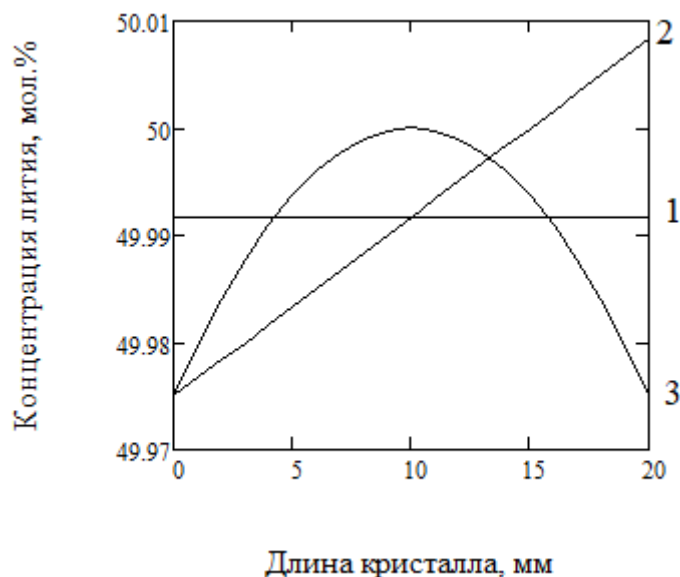


Рисунок 2 – Распределение концентрации лития вдоль оси кристалла: постоянная концентрация (1), линейно нарастающей (2), параболической (3).

Как можно отметить из рис. 2 концентрация лития в кристалле будет влиять на его изменения показателей преломления из-за отклика самой кристаллической структуры на изменение температурного поля внутри кристалла, далее будет отмечено, как именно данные изменения будут влиять на саму разности фаз относительно его постоянного состава. Концентрация лития в кристалле ниобата лития может влиять на его показатель преломления. Показатель преломления – это оптическая характеристика материала, определяющая, каким образом лазерное излучение распространяется в этом материале.

В случае кристалла ниобата лития, показатель преломления зависит от ориентации кристаллической решетки и относительного содержания лития. Замена небольшой части ионов ниобия на ионы лития в кристаллической решетке приводит к изменению показателя преломления.

При увеличении концентрации лития в ниобате лития, обычно наблюдается увеличение показателя преломления. Это связано с тем, что ионы лития имеют меньший



радиус, чем ионы ниобия, и замена ниобия на литий в решетке приводит к увеличению электрической поляризуемости материала.

Увеличение поляризуемости, в свою очередь, приводит к увеличению показателя преломления.

Однако следует отметить, что это общая тенденция и может существовать исключения в зависимости от других факторов, таких как температура, ориентация кристалла и т.д.

Состав оказывает значительное влияние на фазовую скорость внутри кристалла, это оказывает изменения на значения полученные из формулы (6) из-за показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн, которые изменяются самим откликом системы. Отообразим это влияние с помощью математической модели, на рисунке 3.

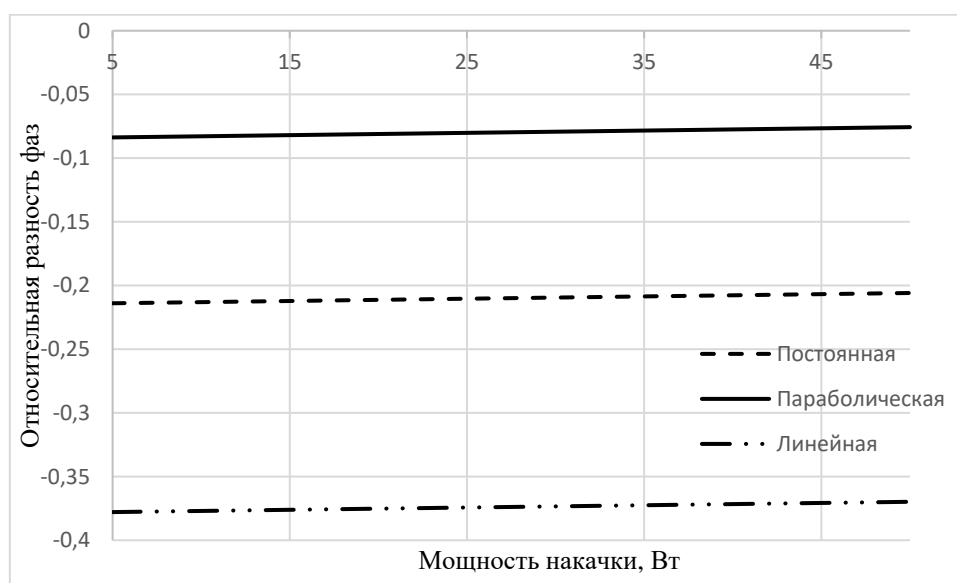


Рисунок 3 – Влияние различных концентрационных профилей лития на разность фаз при различных мощностях накачки.

Мощность лазера не оказывает непосредственного влияния на разность фаз в электрооптическом модуляторе на основе кристалла ниобата лития. Однако мощность лазера может оказывать влияние на общую производительность модулятора и качество его работы.

Электрооптический модулятор на основе кристалла ниобата лития использует эффект Поккельса, который позволяет изменять показатель преломления кристалла под действием электрического поля. При изменении показателя преломления меняется фаза лазерного излучения, проходящего через кристалл.

Мощность лазера определяет интенсивность светового сигнала, который будет проходить через модулятор, что будет изменять температурное поле и показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волны соответственно. Более мощный лазер может обеспечивать более высокую интенсивность света, что может быть полезным в приложениях, требующих высокой чувствительности и динамического диапазона.

Однако при работе с более мощным лазером также могут возникать некоторые проблемы. Высокая мощность лазера может вызывать оптические нелинейности в кристалле ниобата лития, такие как самофокусировка [7] или оптические искажения. Эти эффекты могут привести к нелинейным искажениям фазы света, что может снизить производительность модулятора или вызвать искажение сигнала.



Проведем анализ полученного рисунка из математической модели для электрооптического модулятора, как можно заметить различные концентрации оказали влияние на саму кристаллическую систему, из рис. 3, видно, что параболический градиент позволяет увеличить разность фаз на 20-22 % в сравнении с постоянной концентрацией и на 39-37% с линейно нарастающей концентрацией. Так же стоит отметить, что наибольшую разность фаз после прохождения кристалла приобретает параболический концентрационный профиль. Он наиболее активно оказывает влияние на фазовые скорости внутри кристалла, что и приводит к изменению показателя преломления в соответствии с уравнением Сельмеера [8].

Так как температура внутри кристалла и окружающей среды были равны мы можем рассмотреть влияние лазерного излучения для различных концентраций на температурное поле внутри кристалла. Из-за того что температурное поле оказывает влияние на показатели преломления для необыкновенной и обыкновенной волн соответственно интерполировав значения полученные для локальных точек температур в уравнение Сельмеера [8], получим рисунки для разности показателей преломления в уравнении (6).

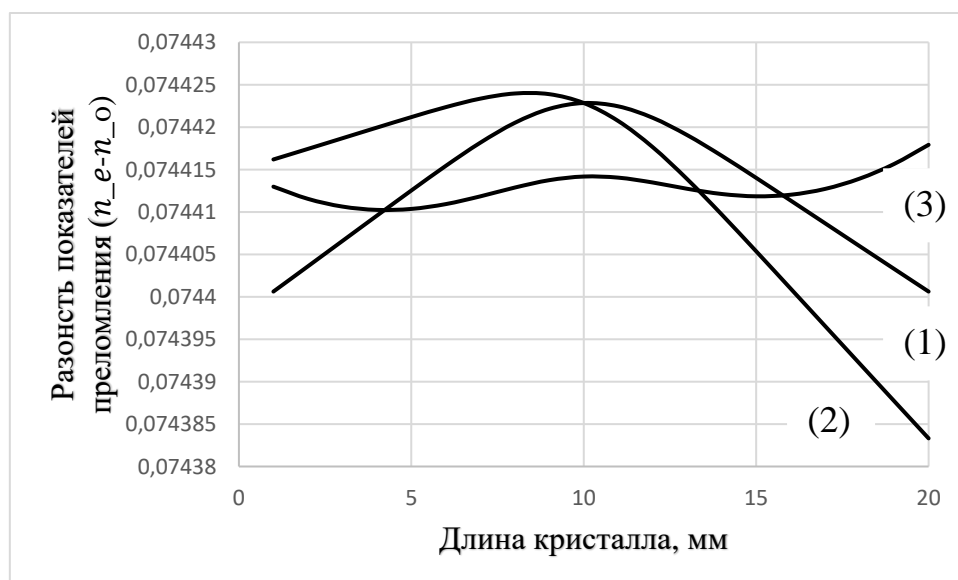


Рисунок 4 – Значение разности показателей преломления, необыкновенной и обыкновенной волн соответственно, по всей длине кристалла для различных концентрационных профилей: постоянная концентрационный (1), линейно нарастающий (2), параболический (3).

Изменение температуры действительно оказывает влияние на показатели преломления в кристалле ниобата лития. Обычно показатель преломления материала зависит от температуры и изменяется с ее изменением.

Как можно отметить рис. 4 предоставляет нам несколько важных значений для данной работы, прежде всего различные концентрации смещают рабочую точку для электрооптического модулятора при постоянном напряжении. Далее как можно заметить при работе лазера на мощности 50 Вт пик для линейно нарастающей концентрации оказался на длине кристалла Ниобата Лития в 8 мм, для постоянной концентрации, как и следовало ожидать в середине кристалла – 10 мм, а параболическая концентрация показала нам 3 пика и 2 прогиба. Наиболее высший пик был в конце кристалла – 20 мм. Так же данный рисунок предоставил нам информацию почему в рис. 3 в конце кристалла наибольшую разность фаз



показал параболический концентрационный профиль, а наименьшую возрастающий линейный соответственно.

Работа выполнена при поддержке проекта FZEN-2023-0006

*Список литературы:*

1. Bazzan M., Sada C. // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2., P. 040603. 040603 (2015).
2. Eltes F., Mai C., Caimi D. A BaTiO<sub>3</sub>-based electro-optic Pockels modulator monolithically integrated on an advanced silicon photonics platform. J. Light. Technol., 2019, vol. 37, no. 5, pp. 1456–1462.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2893500>
3. Schlarb U., Betzler K. Ferroelectrics, 156, 99 (1994).
4. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин, А.В. Гамиловская, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. С 65–86.
5. Сивухин Д. В. § 89. Поглощение света и уширение спектральных линий // Общий курс физики. — М., 2005. — Т. IV. Оптика. — С. 582—583.
6. Louchev O.A., Yu Nan Ei, Kurimura Sunao, Kitamura Kenji. Appl. Phys. Lett., 87, 131101 (2005).
7. А. П. Сухоруков. Самофокусировка света. // Физическая энцикло-педия. — Т. 4. — М.: БРЭ, 1994. — С. 415—417.
8. Parravicini J., Safioui J., Degiorgio V., Minzioni P., Chauvet M. All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals // Journal of Applied Physics, № 109, 2011. С. 033106.

