

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗОННЫХ ДИАГРАММ

Т.Л. Лотфоллахи<sup>1,\*</sup>, Р.Х. Гайнутдинов<sup>1,2</sup>, А.И. Гарифуллин<sup>1</sup>, М.А. Хамадеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт Физики, Казанский (Приволжский) Федеральный университет  
420008, Казань, ул. Кремлевская, д.16А

<sup>2</sup>Институт прикладных исследований, Академия наук Республики Татарстан  
420111, Казань, ул. Баумана, д.20

\*e-mail: TLLotfollakhi@stud.kpfu.ru

Исследована зависимость ширины фотонной запрещенной зоны от угла падения света, от оптической плотности материалов фотонного кристалла и от толщин слоев фотонно-кристаллической структуры. Была выведена трансцендентная функция дисперсионных соотношений методом матриц распространения. Также были построены дисперсионные соотношения в фотонно-кристаллических структурах «диоксид кремния - вакуум» и «ниобат лития - вакуум». Показана возможность управления шириной запрещенной зоны посредством изменения параметров фотонно-кристаллической структуры.

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, фотонная запрещенная зона, зонная диаграмма, дисперсионные соотношения, диоксид кремния, ниобат лития.

## 1. Введение

Фотонным кристаллом принято называть среду, в которой диэлектрическая проницаемость периодически изменяется с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света [1]. Благодаря брэгговской дифракции света на краю зоны Бриллюэна фотонно-кристаллической структуры возникает фотонная запрещенная зона [2,3], аналогичная запрещенной зоне в полупроводниковых материалах. В фотонном кристалле запрещенная зона соответствует энергии или диапазону частот, при котором распространение света в структуре запрещено. Благодаря этому свойству фотонно-кристаллические структуры находят широкое применение в различных устройствах фотоники: дифракционные решетки и фильтры [4,5], волноводы и оптические переключатели [6,7], просветление оптики [8], сенсоры [9], низкопороговые лазеры, запоминающие устройства [10] и т.п.

В настоящей работе рассматривается возможность управления свойствами фотонных запрещенных зон фотонно-кристаллической структуры за счет изменения угла падения света, а также толщины слоев в структурах «диоксид кремний (SiO<sub>2</sub>) – вакуум» и «ниобат лития (LiNbO<sub>3</sub>) – вакуум».

## 2. Метод матриц распространения

В ходе работы была выведена трансцендентная функции дисперсионных соотношений методом матриц распространения, которая приняла вид:

$$\cos(k_z a) = \cos(\varphi_h) \cos(\varphi_l) - \varepsilon^{TE, TM} \sin(\varphi_h) \sin(\varphi_l), \quad (1)$$

где  $\varepsilon^{TE, TM} = (r_{TE, TM} + r_{TE, TM}^{-1})/2$  [11].

В настоящей работе рассматривались одномерные фотонно-кристаллические структуры «диоксид кремний (SiO<sub>2</sub>) – вакуум» и «ниобат лития (LiNbO<sub>3</sub>) – вакуум». Были определены показатели преломления для диоксида кремния и ниобата лития. На практике показатель преломления зависит от энергии фотона. Для упрощения задачи

было определено среднее значение показателя преломления. Это необходимо, чтобы не учитывать теорию возмущений. Также метод матриц распространения в этом случае был бы не применим. Для  $\text{SiO}_2$  среднее значение показателя преломления равно  $n_{\text{SiO}_2} \approx 1,58$ . Для  $\text{LiNbO}_3$  среднее значение показателя преломления равно  $n_{\text{LiNbO}_3} \approx 2,27$ .

При использовании метода матриц распространения необходимо учитывать, что свет раскладывается на две компоненты: поперечно электрическую (ТЕ-поляризация) и поперечно магнитную (ТМ-поляризация). Для каждого случая были рассчитаны дисперсионные соотношения для углов  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , которые представлены на графиках пунктиром, пунктиром с точкой, пунктиром с двумя точками и точками соответственно. Сплошным графиком показана линия света в вакууме. Полученные дисперсионные соотношения представлены на рис. 1-8. Также были рассчитаны относительные ширины запрещенных зон для первых двух мод и представлены в таблицах 1-4.

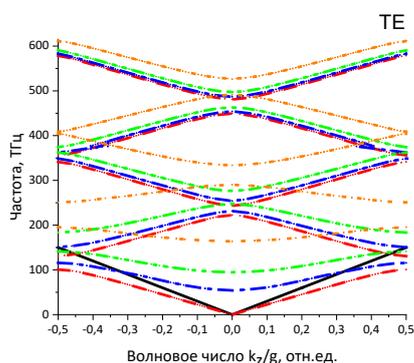


Рис. 1. Дисперсионные соотношения для « $\text{SiO}_2$ -вакуум» (500 нм + 500 нм)

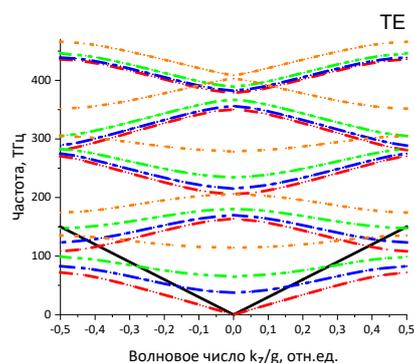


Рис. 2. Дисперсионные соотношения для « $\text{LiNbO}_3$ +вакуум» (500 нм + 500 нм)

Таблица 1. Относительные ширины запрещенных зон для ТЕ-поляризации

	$\text{SiO}_2$	$\text{LiNbO}_3$
$0^\circ$	23,5%	40,0%
$30^\circ$	23,7%	39,4%
$45^\circ$	18,7%	39,0%
$60^\circ$	9,6%	25,2%

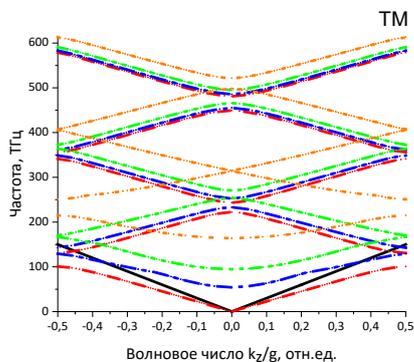


Рис. 3. Дисперсионные соотношения для « $\text{SiO}_2$ +вакуум» (500 нм + 500 нм)

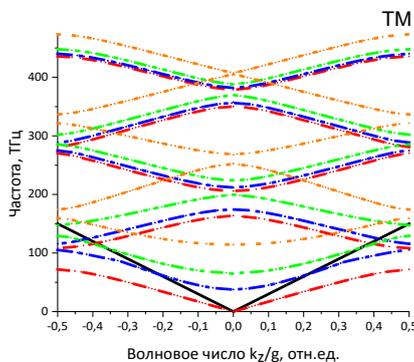


Рис. 4. Дисперсионные соотношения для « $\text{LiNbO}_3$ +вакуум» (500 нм + 500 нм)

Таблица 2. Относительные ширины запрещенных зон для ТМ-поляризации

	SiO <sub>2</sub>	LiNbO <sub>3</sub>
0 <sup>0</sup>	26,0%	40,0%
30 <sup>0</sup>	9,9%	9,5%
45 <sup>0</sup>	1,8%	13,0%
60 <sup>0</sup>	15,5%	9,0%

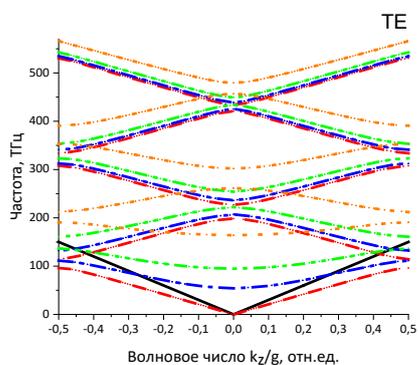


Рис. 5. Дисперсионные соотношения для «SiO<sub>2</sub>+вакуум» (700 нм + 300 нм)

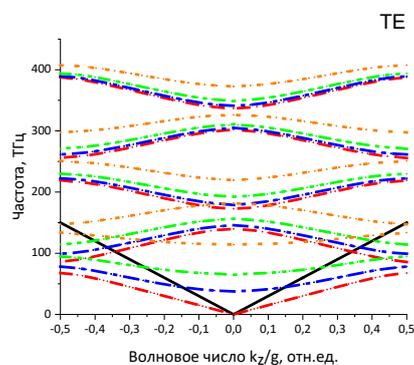


Рис. 6. Дисперсионные соотношения для «LiNbO<sub>3</sub>+вакуум» (700 нм + 300 нм)

Таблица 3. Относительные ширины запрещенных зон для ТЕ-поляризации

	SiO <sub>2</sub>	LiNbO <sub>3</sub>
0 <sup>0</sup>	17,1%	23,5%
30 <sup>0</sup>	17,3%	23,7%
45 <sup>0</sup>	16,2%	18,7%
60 <sup>0</sup>	10,4%	9,6%

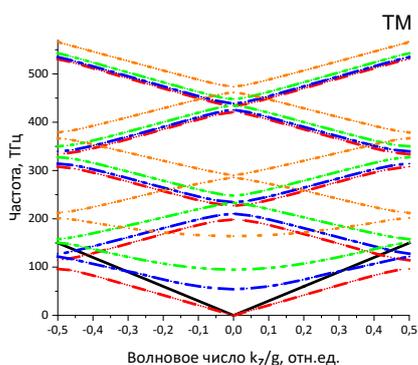


Рис. 7. Дисперсионные соотношения для «SiO<sub>2</sub>+вакуум» (700 нм + 300 нм)

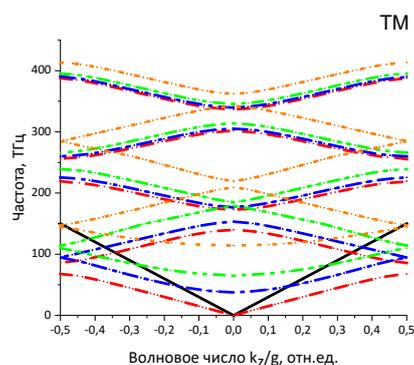


Рис. 8. Дисперсионные соотношения для «LiNbO<sub>3</sub>+вакуум» (700 нм + 300 нм)

Таблица 4. Относительные ширины запрещенных зон для ТМ-поляризации

	SiO <sub>2</sub>	LiNbO <sub>3</sub>
0 <sup>0</sup>	17,1%	23,5%
30 <sup>0</sup>	4,8%	0,0%
45 <sup>0</sup>	4,9%	4,0%
60 <sup>0</sup>	5,1%	2,1%

### 3. Заключение

В данной работе была выведена трансцендентная функция дисперсионных соотношений методом матриц распространения. Построены дисперсионные соотношения в одномерных фотонно-кристаллических структурах на основе диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ). Произведен расчёт относительной ширины запрещенной зоны в зависимости от толщин слоев фотонно-кристаллических структур. Изменение угла падения света на периодическую структуру позволяет сдвигать частоты света, локализованные в диэлектрическом или вакуумном слоях. Управляя параметрами фотонно-кристаллической структуры, такими как толщины и показатели преломления оптически плотных слоев, мы можем управлять шириной запрещенной зоны, что важно при проектировании и создании устройств фотоники.

### Литература

1. Ивченко Е.Л., Поддубный А.Н. Резонансные трехмерные фотонные кристаллы // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. №. 3. С. 540.
2. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. №. 20. P. 2059.
3. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. №. 23. P. 2486.
4. Ultra-high tunable liquid crystal-plasmonic photonic crystal fiber polarization filter / M. F. O. Hameed [et al.] // Opt. express. 2015. V. 23. №. 6. P. 7007.
5. Spectral characteristics of broad band-rejection filter based on Bragg grating, one-dimensional photonic crystal, and subwavelength grating waveguide / S. N. Khonina [et al.] // Phys. Scr. 2021. V. 96. №. 5. P. 055505.
6. Two-photon controlled-phase gates enabled by photonic dimers / Z. Chen [et al.] // Phys. Rev. A. 2021. V. 103. №. 5. P. 052610.
7. Takeda H., John S. Compact optical one-way waveguide isolators for photonic-band-gap microchips // Phys. Rev. A. 2008. V. 78. №. 2. P. 023804.
8. Analysis and fabrication of antireflective coating for photovoltaics based on a photonic-crystal concept and generated by evolutionary optimization / P. Bennet [et al.] // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. №. 12. P. 125135.
9. Two-dimensional photonic crystal chemical and biomolecular sensors / Z. Cai [et al.] // Anal. Chem. 2015. V. 87. №. 10. P. 5013.
10. Photonic-crystal lasers with two-dimensionally arranged gain and loss sections for high-peak-power short-pulse operation / R. Morita [et al.] // Nat. Photonics. 2021. V. 15. №. 4. P. 311.
11. Skorobogatiy M., Yang J. Fundamentals of Photonic Crystal Guiding, Cambridge University Press, 2009. 267 p.

# INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS BASED ON SILICON DIOXIDE AND LITHIUM NIOBATE USING BAND DIAGRAMS

T.L. Lotfollakhi<sup>1,\*</sup>, R.Kh. Gainutdinov<sup>1,2</sup>, A.I. Garifullin<sup>1</sup>, M.A. Khamadeev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physics, Kazan Federal University  
420008, Kazan, Kremlevskaya St., 16a*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences  
420111, Kazan, Bauman St., 20*

\*e-mail: TLLotfollakhi@stud.kpfu.ru

The dependence of the width of the photonic band gap on the angle of incidence of light, on the optical density of photonic crystal materials and on the thicknesses of the layers of the photonic crystal structure is investigated. The transcendental function of dispersion relations was derived by the method of propagation matrices. Dispersion relations in photonic crystal structures "silicon dioxide - vacuum" and "lithium niobate - vacuum" were also constructed. The possibility of controlling the band gap width by changing the parameters of the photonic crystal structure is shown.

**Key words:** photonic crystal, photonic band gap, band diagram, dispersion relations, silicon dioxide, lithium niobate.