

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ И НАНОСТРУКТУР

И.Н. Алиев¹

М.М. Яшин^{1,2}

А.А. Лобойко¹

О.О. Горбатова¹

Р.Э. Лятифов¹

yashin.m@bmstu.ru

loboyko@bmstu.ru

goo18f023@student.bmstu.ru

lyatifovrea@student.bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложено обоснование зависимости диэлектрической проницаемости, дисперсии поляритонов и скорости световой группы в уранилацетате натрия от длины волны. В спектрах пропускания и поглощения ураниловых соединений обнаружено множество полос. Установлено, что вблизи частот резонансного поглощения групповая скорость поляритонных волн аномально падает, т. е. происходит эффективная остановка света. Это приводит к аномальному возрастанию эффективности процессов взаимодействия света с веществом. Исследованы оптические свойства одномерной фотонно-кристаллической пленки, образованной методом электрохимического протравливания алюминиевой фольги. Проведено сопоставление экспериментальных данных по спектрам пропускания и отражения в области первой, второй и третьей стоп-зон анодного фотонного кристалла оксида алюминия с теоретической зависимостью, полученной из известного дисперсионного соотношения. Теоретически рассчитаны показатели преломления первого и второго слоев различных тонких фотонно-кристаллических пленок, период структуры, эффективный показатель преломления структур, установлена возможность управления положением стоп-зон одномерных фотонных кристаллов в соответствии с соотношением Вульфа — Брэгга. Исследованные фотонные кристаллы могут быть использованы в экспериментальных установках для регистрации спектров комбинационного рассеяния света диэлектрических сред в области низких частот

Ключевые слова

Фотонный кристалл, стоп-зона, коэффициент отражения, закон дисперсии, уранилацетат, спектры пропускания

Поступила 16.06.2022

Принята 29.09.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. В настоящее время особенно актуально исследование оптических свойств фотонных кристаллов ввиду возможности их применения в новейших устройствах наноэлектроники хранения данных, квантовых процессорах, лазерах [1–3]. В связи с этим важны исследования объектов с периодическим изменением показателя преломления.

Методика исследования предложена в 2015 г. В.С. Гореликом и И.Н. Алиевым и успешно апробирована при исследовании синтетических опаловых матриц [4]. Следует отметить, что исследования в этом направлении интенсивно продолжаются и в настоящее время [5].

Цель работы — изучение дисперсионных зависимостей в ураниловых соединениях и моделирование оптических свойств фотонных кристаллов для создания на их основе перспективных регулируемых элементов электроники.

Закон дисперсии в ураниловых соединениях. В электронной теории дисперсии движение электрона в атоме на внешнем поле $E = E_0 \exp(i\omega t)$ описывается простой моделью:

$$m_0 \ddot{x} = -m_0 \omega_0^2 x + q_0 E_0 e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где ω — частота фотона внешней области. Из решения уравнения (1)

$$x = \frac{q_0}{m_0(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 e^{i\omega t}$$

следует, что электрическая поляризация для среды с концентрацией атомов n_0 :

$$P = n_0 q_0 x = \frac{n_0 q_0^2}{m_0(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 e^{i\omega t}.$$

Соответственно, диэлектрическая постоянная среды материала зависит от частоты внешнего поля следующим образом:

$$\varepsilon = 1 + \frac{n_0 q_0^2}{\varepsilon_0 m_0 (\omega_0^2 - \omega^2)} \equiv 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{(\omega_0^2 + \omega_p^2) - \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{\omega_l^2 - \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2)$$

Здесь $\omega_p = \sqrt{n_0 q_0^2 / (\varepsilon_0 m_0)}$ — плазменная частота; $\omega_l = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_p^2}$ — частота продольной моды. Если рассматривать большее число полярных осцилляторов, то с учетом высокочастотной диэлектрической проницаемости ε_∞ (2) принимает вид:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty \prod_j \frac{\omega_{lj}^2 - \omega^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}, \quad (3)$$

где ω_j, ω_{0j} — характерные частоты полярных осцилляторов среды. Среднее значение волнового числа электромагнитного поля:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} n = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_\infty \prod_j \frac{\omega_{lj}^2 - \omega^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}} \mu. \quad (4)$$

Групповая скорость электромагнитной (поляритонной) волны:

$$V(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \left(\frac{dk(\omega)}{d\omega} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Здесь ω — угловая частота; k — волновое число.

Эффективная масса соответствующих поляритонов находится по формуле [6, 7]:

$$m = \left(\frac{d^2E}{dp^2} \right)^{-1} = \hbar \left(\frac{d^2\omega}{dk^2} \right)^{-1} = \hbar \left(V(\omega) \frac{dV(\omega)}{d\omega} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Из (3), (5) следует, что групповая скорость поляритонов приближается к нулю, когда $\omega \rightarrow \omega_j$.

Согласно формуле Френеля, коэффициент пропускания среды возрастает с частотой электромагнитной волны. При $n = 1$ поляритоны становятся унитарными, а среда — практически прозрачной. Установлено, что вблизи области края поглощения уранилацетата наблюдаются резонансы частоты полярных осцилляторов-электронов атомов урана. Дисперсия диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 + \sum_j \frac{f_j}{\lambda^2 - \lambda_{0j}^2}, \quad (7)$$

где f_j — сила осциллятора; λ, λ_{0j} — длины волн поляритонов.

Для простоты разберем случай, когда длины волн одинаковы. При этом значение f_j может быть оценено с использованием показателя преломления для D -линии натрия ($\lambda_D = 589,3$ нм): $n_D = 1,504$. Тогда сила осциллятора находится как

$$f_j = \frac{\varepsilon(\lambda_D) - 1}{\sum_j 1/(\lambda_D^2 - \lambda_{0j}^2)} = \frac{n_D^2 - 1}{\sum_j 1/(\lambda_D^2 - \lambda_{0j}^2)}.$$

Получаем $f_j = 1,3 \cdot 10^{-14}$ м².

Вычислим функцию диэлектрической проницаемости уранилацетата от длины волны внешнего электромагнитного поля. Результаты расчета показаны на рис. 1, где заметно более девяти резонансов вблизи края поглощения кристалла уранилацетата. Точки на кривых, для которых $\varepsilon(\lambda) = 1$, соответствуют значениям длин волн унитарных поляритонов.

Для этих поляритонов на рис. 2 показана дисперсия. Сплошные основные линии соответствуют поляритонным кривым, построенным по (4), а тонкие — электромагнитным волнам в вакууме $\omega = ck$.

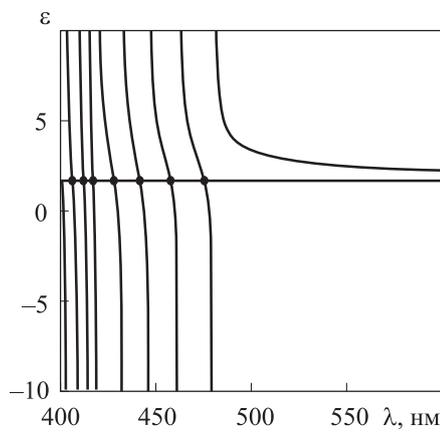


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости от длины волны (согласно (7))

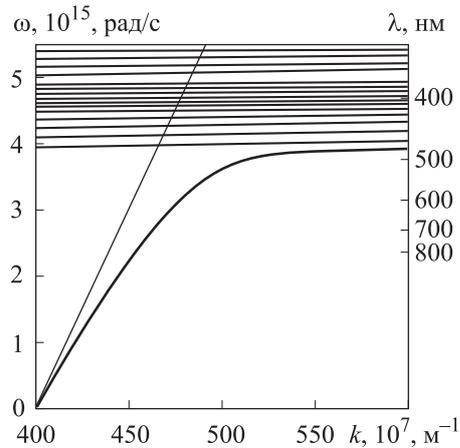


Рис. 2. Дисперсия поляритонов в уранилацетате натрия

Графики функции групповой скорости поляритонов $V(\lambda)$ приведены на рис. 3. При этом кривые на рис. 3, а соответствуют линейному масштабу, а на рис. 3, б — логарифмическому. Существуют области с предельно низкой групповой скоростью поляритонов. С учетом соотношения $W = S/V(\lambda)$ для плотности электромагнитной энергии W и вектора Умова S (плотности потока энергии) при устремлении к нулю групповой скорости $V(\lambda)$ поляритонов плотность электромагнитной энергии стремится к бесконечности. Поляритоны хорошо взаимодействуют с веществом. Таким образом, в рассматриваемых кристаллах с ураниловыми группами процессы комбинационного рассеяния весьма вероятны при конкретных значениях длин волн излучения.

Формула (6) позволяет рассчитать эффективную массу поляритонов $m_{ef} \approx 10^{-34}$ кг (рис. 4).

В настоящей работе использована возможность исследования уранилацетата за счет внедрения указанных соединений в поры одномерных

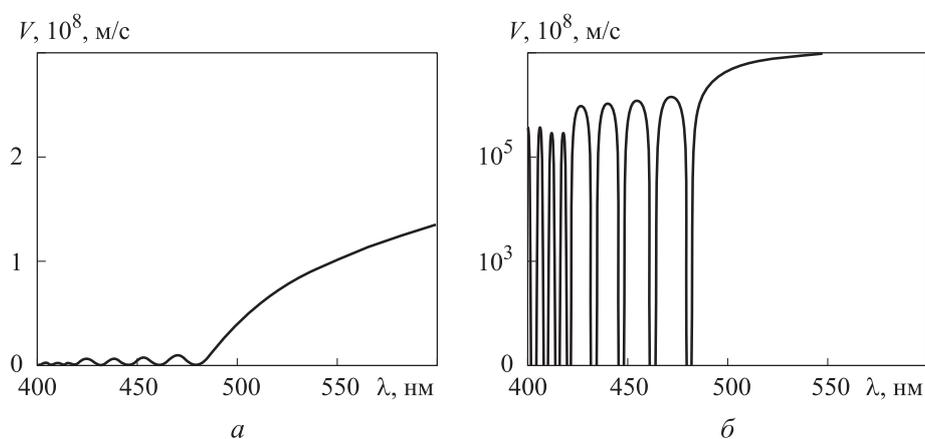


Рис. 3. Зависимость скорости световой группы в уранилацетате натрия, рассчитанной по (5), от длины волны в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах

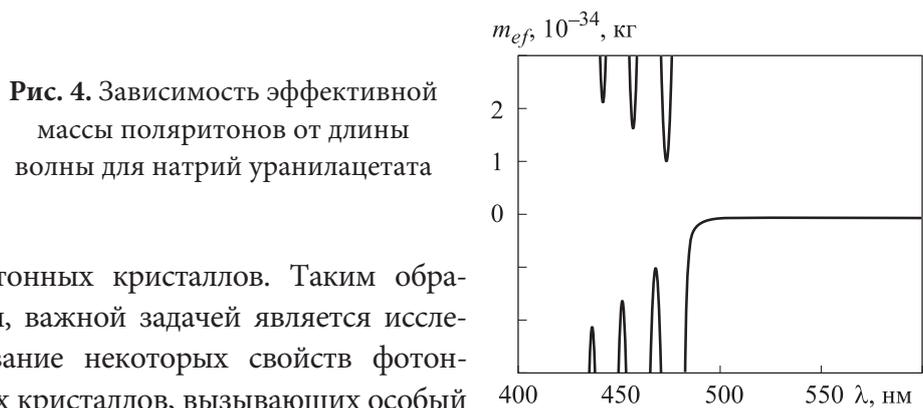


Рис. 4. Зависимость эффективной массы поляритонов от длины волны для натрия уранилацетата

фотонных кристаллов. Таким образом, важной задачей является исследование некоторых свойств фотонных кристаллов, вызывающих особый интерес как с позиции фундаментальной науки, так и практического применения.

Моделирование оптических свойств фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы представляют собой оптические среды с периодически изменяющимися показателями преломления. В качестве исследуемых образцов использованы тонкие фотонно-кристаллические пленки оксида алюминия с конечным числом слоев. Образцы получены электрохимическим травлением [11].

Поверхности и разрезы исследуемых фотонных кристаллов показаны на рис. 5–7. При этом нерегулярность пор обусловлена зернистой структурой исходной поликристаллической пленки алюминия.

В Лаборатории комбинационного рассеяния ФИАН получены спектры отражения рассматриваемых фотонных кристаллов. Использован широкополосный источник излучения.



Рис. 5. Мезопористые фотонные кристаллы на основе анодного оксида алюминия при различных значениях угла наблюдения отраженного излучения

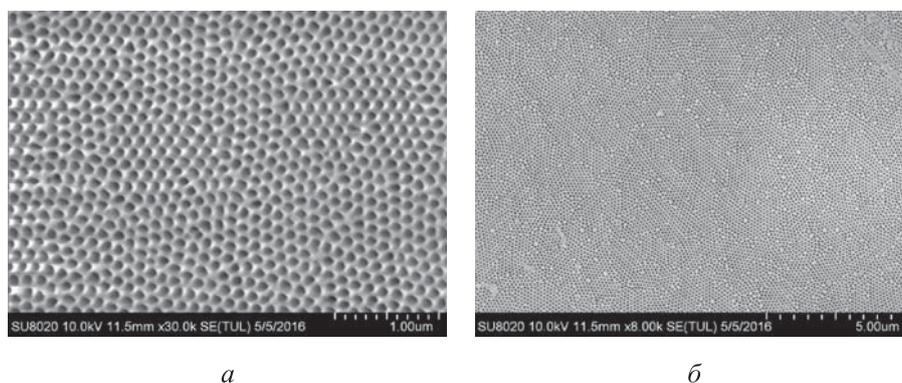


Рис. 6. Электронные фотографии поверхности исследуемой фотонно-кристаллической пленки мезопористого анодного оксида алюминия, полученные при сканировании микроскопом с ценой деления 1 (а) и 5 мкм (б)

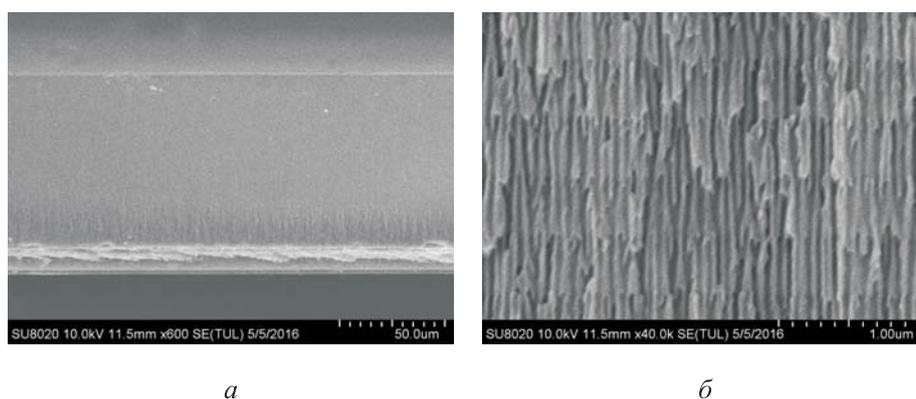


Рис. 7. Фотографии боковой поверхности фотонно-кристаллической пленки мезопористого оксида алюминия, полученные при сканировании микроскопом с ценой деления 5 (а) и 0,1 мкм (б)

Схема экспериментальной установки (рис. 8) для регистрации спектров отражения представляла собой алюминиевую пластину, на которой закреплена фотонно-кристаллическая пленка. Из источника излучения по кварцевым световодам излучение попадало в волоконно-оптический зонд. Отраженное излучение фиксировал мини-спектрометр с многоэлементным приемником, который подключен к компьютеру. Спектры зеркального отражения и пропускания для двух различных фотонно-кристаллических пленок приведены на рис. 9, 10.

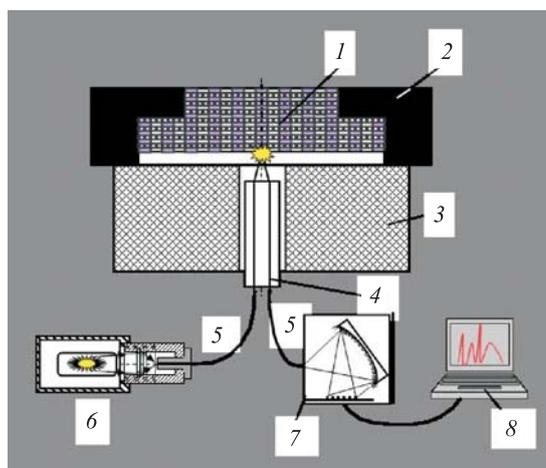


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для регистрации спектров отражения от поверхности фотонно-кристаллической пленки оксида алюминия:

1 — фотонный кристалл; 2 — алюминиевая пластина; 3 — фторопластовый держатель; 4 — волоконно-оптический зонд; 5 — кварцевые световоды; 6 — источник излучения; 7 — мини-спектрометр с многоэлементным приемником; 8 — компьютер

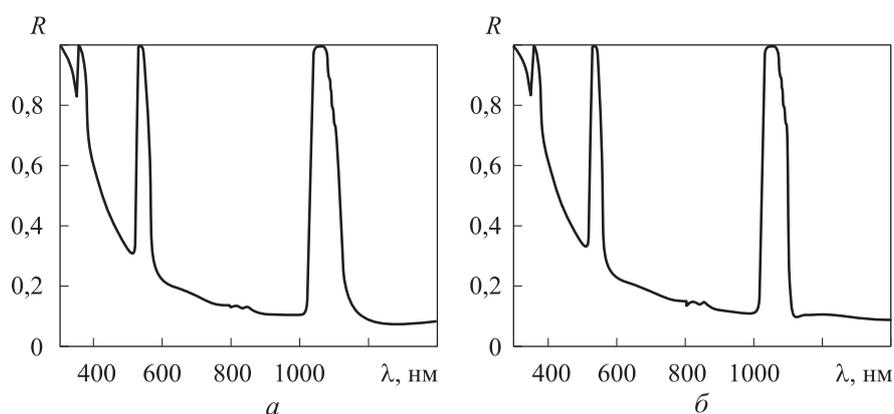


Рис. 9. Спектры отражения широкополосного излучения от поверхности фотонно-кристаллических образцов № 1 (а) и № 2 (б) при нормальном угле падения излучения

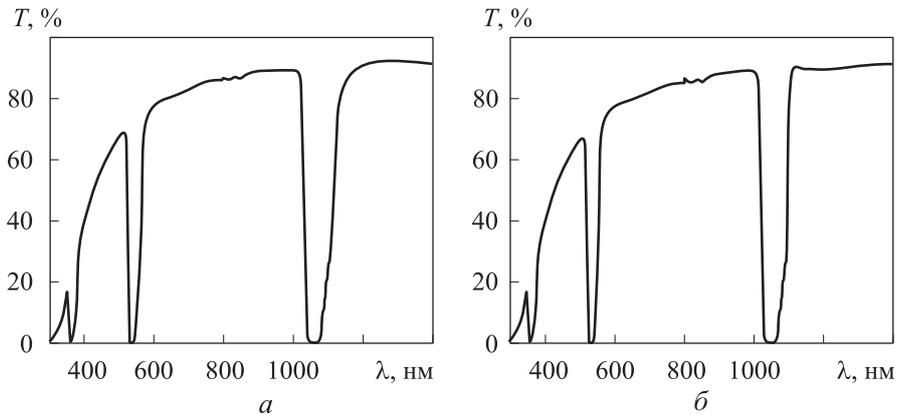


Рис. 10. Спектры пропускания широкополосного излучения анодных фотонно-кристаллических пленок № 1 (а) и № 2 (б)

Согласно спектрам на рис. 9 и 10, имеют место резкие минимумы в спектрах пропускания и максимумы в спектрах отражения электромагнитного излучения от кристаллических пленок одномерных фотонных кристаллов в областях первой, второй и третьей стоп-зон. Для образца № 1 минимумы пропускания соответствуют значениям длины волн 1058, 534 и 360 нм, а для образца № 2 — 1041, 526 и 355 нм.

Показатель преломления первого слоя пленки в области m -й стоп-зоны рассчитывается по выражению [12]:

$$n_1(\lambda_m) = \sqrt{(1-\delta)n_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2(\lambda_m) + \delta n_{\text{air}}^2}. \quad (8)$$

Здесь $\delta = 0,5$ — пористость слоя; $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}(\lambda_m)$, n_{air} — показатели преломления монокристалла оксида алюминия и воздуха.

Связь ширины и спектрального положения стоп-зоны с показателями слоев описывается соотношением [12]:

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_m} = \frac{4}{\pi} \frac{n_1(\lambda_m) - n_2(\lambda_m)}{n_1(\lambda_m) + n_2(\lambda_m)}. \quad (9)$$

Здесь n_1 , n_2 — показатели преломления первой и второй среды фотонного кристалла. Из (8), (9) найдем показатель

$$n_2(\lambda_m) = n_1(\lambda_m) \frac{4\lambda_m - \pi\Delta\lambda_m}{4\lambda_m + \pi\Delta\lambda_m}. \quad (10)$$

Эффективный показатель преломления образца связан с показателями преломления слоев соотношением

$$n_{ef}(\lambda_m) = \sqrt{n_1^2(\lambda_m) \frac{a_1}{a} + n_2^2(\lambda_m) \frac{a_2}{a}}, \quad (11)$$

где $a/2 = a_1 = a_2$ — толщины слоев.

На основе экспериментальных данных и с использованием формул (8)–(11) для образцов установлено следующее:

- № 1 $n_{ef} = 1,36$, $n_1 = 1,44$, $n_2 = 1,29$ и $a = 390,82$ нм;
- № 2 $n_{ef} = 1,37$, $n_1 = 1,43$, $n_2 = 1,30$ и $a = 383,10$ нм.

Исходя из полученных характеристических параметров фотонных кристаллов в рамках модели Кронига — Пенни [13] определен вид дисперсионных кривых для образцов № 1 и № 2 (рис. 11).

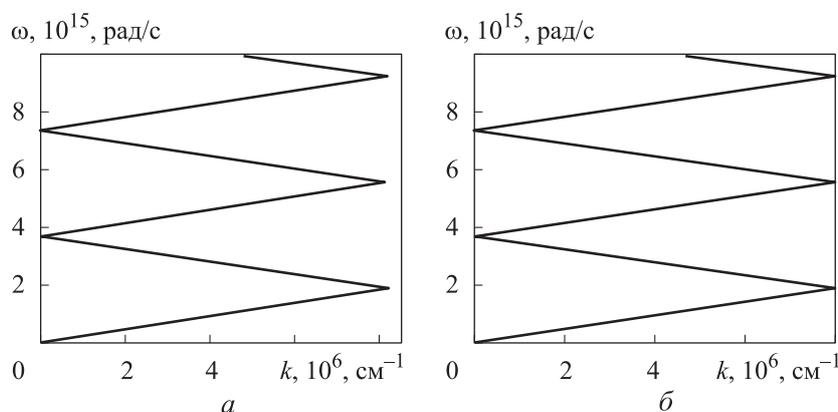


Рис. 11. Вид дисперсионных кривых для образцов № 1 (а) и № 2 (б)

В соответствии с формулами Френеля [13] получены модельные зависимости спектров зеркального отражения и выполнено сравнение (рис. 12) с экспериментальными спектрами, представленными на рис. 9.

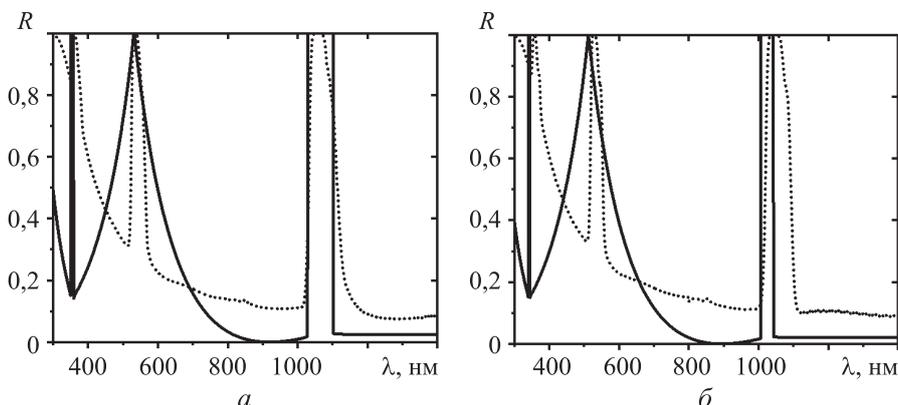


Рис. 12. Сравнение экспериментальных (штриховая линия) и теоретических (сплошная линия) данных спектров отражения для образцов № 1 (а) и № 2 (б)

Экспериментально зарегистрированные спектры отражения близки к теоретическим. Наблюдаемые различия могут быть обусловлены необходимостью учета конечного числа слоев в анализируемых фотонно-кристаллических пленках, а также неоднородностью исследуемых структур.

Исходя из соотношения Вульфа — Брэгга [14] есть возможность изменять положение стоп-зон фотонного кристалла путем поворота поверхности кристалла на заданный пространственный угол. Установлено, что для достижения положения второй стоп-зоны на заданную длину волны излучения 532 нм необходимо, чтобы образец № 1 был повернут на 85° , а образец № 2 — на 84° . Для достижения положения первой стоп-зоны на длину волны излучения 1064 нм необходимо, чтобы образец № 1 был повернут на 85° , а образец № 2 — на 82° .

Заключение. Полученные результаты позволяют создать на основе исследуемых структур различные элементы электроники, в том числе регулируемые узкополосные фильтры в видимой области спектра, что важно при регистрации спектров комбинационного рассеяния и фотолуминесценции, генерации различных оптических гармоник и др. [15–18].

Приведенные теоретические выкладки доказывают обоснованность опубликованных ранее результатов [19–20].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горелик В.С. Оптика глобулярных фотонных кристаллов. *Квантовая электроника*, 2007, т. 37, № 5, с. 409–432.
- [2] Young B.L. A survey of dark matter and related topics in cosmology. *Front. Phys.*, 2017, vol. 12, no. 2, art. 121201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11467-016-0583-4>
- [3] Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В. и др. Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов. *Российский технологический журнал*, 2021, т. 9, № 3, с. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>
- [4] Алиев И.Н., Горелик В.С., Зайцев К.И. и др. Нелинейная оптическая конверсия в синтетических опаловых матрицах. *Неорганические материалы*, 2015, т. 51, № 5, с. 419–415. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002337X15050024>
- [5] Лобойко А.А. Экспериментальное изучение спектроскопических свойств ураниловых соединений. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калуга, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022.
- [6] Бирман Д.Л., Котлес Э.С. Экситоны. М., Наука, 1985.
- [7] Лахно В.Д., Чуев Г.Н. Структура полярона большого радиуса в пределах сильной связи. *УФН*, 1995, т. 165, № 3, с. 285–298. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199503c.0285>

- [8] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y., Krylov A.S. Raman light scattering in sodium nitrite crystals. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2016, vol. 43, no. 5, pp. 167–173.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335616050043>
- [9] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y., Krylov A.S. Raman scattering in a ferroelectric sodium nitrite crystal. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 9, pp. 1127–1130.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816090136>
- [10] Горелик В.С., Лобойко А.А., Нечипуренко С.О. и др. Резонансное возбуждение фотолюминесценции в водном растворе уранилацетата. *Неорганические материалы*, 2018, т. 54, № 7, с. 733–738.
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002337X18070138>
- [11] Liu Y., Chang Y., Ling Z., et al. Structural coloring of aluminum. *Electrochem. Commun.*, 2011, vol. 13, no. 12, pp. 1336–1339.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.08.008>
- [12] Yariv A., Yeh P. *Optical waves in crystals*. Wiley, 1984.
- [13] Gorelik V.S., Yashin M.M., Bi D., et al. Transmission spectra and optical properties of a mesoporous photonic crystal based on anodic aluminum oxide. *Opt. Spectrosc.*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 167–173. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X18020078>
- [14] Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т. 1. Теория электромагнитного поля. Теория относительности. Статистическая физика. Электромагнитные процессы в веществе. М., Книга по требованию, 2012.
- [15] Gorelik V.S., Dresvyannikov M.A., Zherikhina L.N., et al. On the possibility of detecting low-energy scalar and pseudo-scalar bosons. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335614010047>
- [16] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Yu. Dispersion dependences for polariton-axion waves in tryptophan crystals. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2014, vol. 41, no. 11, pp. 316–322.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335614110037>
- [17] Gorelik V.S. Dispersion relations of vector and scalar bosons in material media. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2015, vol. 42, no. 2, pp. 55–62.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335615020050>
- [18] Gorelik V.S., Sverbil' P.P. Raman scattering by longitudinal and transverse optical vibrations in lithium niobate single crystals. *Inorg. Mater.*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1104–1110. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168515100076>
- [19] Горелик В.С., Яшин М.М. Узкополосные фильтры в видимом спектральном диапазоне на основе пористого фотонного кристалла. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2016, № 5 (68), с. 105–114.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-5-105-114>
- [20] Горелик В.С., Лобойко А.А. Спектры фотолюминесценции $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$. *Неорганические материалы*, 2019, т. 55, № 8, с. 877–884.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002337X19070066>

Алиев Исмаил Новруз оглы — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Яшин Максим Михайлович — ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший преподаватель кафедры «Наноэлектроника» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Лобойко Алексей Андреевич — ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Горбатова Ольга Олеговна — студентка кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Ляtifов Роман Эйнулла оглы — студент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алиев И.Н., Яшин М.М., Лобойко А.А. и др. Исследование спектроскопических свойств фотонных кристаллов и наноструктур. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 2 (107), с. 35–49.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-35-49>

SPECTROSCOPIC PROPERTIES STUDY OF PHOTONIC CRYSTALS AND NANOSTRUCTURES

I.N. Aliyev¹

M.M. Yashin^{1,2}

A.A. Loboiko¹

O.O. Gorbatova¹

R.E. Lyatifov¹

yashin.m@bmstu.ru

loboyko@bmstu.ru

goo18f023@student.bmstu.ru

lyatifovrea@student.bmstu.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper proposes substantiation of dependence of dielectric permittivity, polariton dispersion and light group velocity in the sodium uranyl acetate on the wavelength. Many bands were found in the uranyl compounds transmission and absorption spectra. It was indicated that the polariton waves group velocity was decreasing anomalously in vicinity of the resonant absorption frequencies, i.e., the light was effectively stopped. This led to abnormal increase in the efficiency

Keywords

Photonic crystal, stop band, reflection coefficient, dispersion law, uranyl acetate, transmission spectra

between the light interaction processes and the matter. Optical properties of the one-dimensional photonic crystal film formed by electrochemical etching of aluminum foil were studied. Experimental data on the transmission and reflection spectra in the region of first, second and third stop bands of the anode photonic aluminum oxide crystal were compared with theoretical dependence obtained from the known dispersion relation. Refractive indices of the first and second layers of various thin photonic crystal films, structure period and effective refractive index of the structures were theoretically calculated. Possibility of controlling position of the stop bands of one-dimensional photonic crystals in accordance with the Wulff — Bragg's relation was established. The studied photonic crystals could be used in experimental setups to register the light combined scattering spectra of dielectric media in the low-frequencies region

Received 16.06.2022

Accepted 29.09.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Gorelik V.S. Optics of globular photonic crystals. *Quantum Electron.*, 2007, vol. 37, no. 5, art. 409. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2007v037n05ABEH013478>
- [2] Young B.L. A survey of dark matter and related topics in cosmology. *Front. Phys.*, 2017, vol. 12, no. 2, art. 121201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11467-016-0583-4>
- [3] Yurasov A.N., Yashin M.M., Gladyshev I.V., et al. Influence of size effects and granule distribution by size on optical and magneto-optical properties of nanocomposites. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal], 2021, vol. 9, no. 3, pp. 49–57 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>
- [4] Aliev I.N., Gorelik V.S., Zaytsev K.I., et al. Nonlinear optical conversion in synthetic opal. *Inorg. Mater*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 419–424. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168515050027>
- [5] Loboyko A.A. Eksperimentalnoe izuchenie spektroskopicheskikh svoystv uranilovykh soedineniy. Avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk [Experimental study of the spectroscopic properties of uranyl compounds. Abs. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Kaluga, BMSTU, 2022.
- [6] Birman D.L., Kotles E.S. Eksitony [Excitons]. Moscow, Nauka Publ., 1985.
- [7] Lakhno V.D., Chuev G.N. Structure of a strongly coupled large polaron. *Phys.-Usp.*, 1995, vol. 38, no. 3, pp. 273–285. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n03ABEH000075>
- [8] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y., Krylov A.S. Raman light scattering in sodium nitrite crystals. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2016, vol. 43, no. 5, pp. 167–173. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335616050043>

- [9] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y., Krylov A.S. Raman scattering in a ferroelectric sodium nitrite crystal. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 9, pp. 1127–1130. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873816090136>
- [10] Gorelik V.S., Loboiko A.A., Nechipurenko S.O., et al. Resonance excitation of photoluminescence in an aqueous uranyl chloride solution. *Inorg. Mater.*, 2018, vol. 54, no. 7, pp. 694–699. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168518070026>
- [11] Liu Y., Chang Y., Ling Z., et al. Structural coloring of aluminum. *Electrochem. Commun.*, 2011, vol. 13, no. 12, pp. 1336–1339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.08.008>
- [12] Yariv A., Yeh P. *Optical waves in crystals*. Wiley, 1984.
- [13] Gorelik V.S., Yashin M.M., Bi D., et al. Transmission spectra and optical properties of a mesoporous photonic crystal based on anodic aluminum oxide. *Opt. Spectrosc.*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 167–173. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X18020078>
- [14] Levich V.G. *Kurs teoreticheskoy fiziki. T. 1. Teoriya elektromagnitnogo polya. Teoriya otноситelnosti. Statisticheskaya fizika. Elektromagnitnye protsessy v veshchestve* [Course of theoretical physics. Vol. 1. Theory of the electromagnetic field. Theory of relativity. Statistical physics. Electromagnetic processes in matter]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2012.
- [15] Gorelik V.S., Dresvyannikov M.A., Zherikhina L.N., et al. On the possibility of detecting low-energy scalar and pseudo-scalar bosons. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335614010047>
- [16] Gorelik V.S., Pyatyshev A.Yu. Dispersion dependences for polariton-axion waves in tryptophan crystals. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2014, vol. 41, no. 11, pp. 316–322. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335614110037>
- [17] Gorelik V.S. Dispersion relations of vector and scalar bosons in material media. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2015, vol. 42, no. 2, pp. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335615020050>
- [18] Gorelik V.S., Sverbil' P.P. Raman scattering by longitudinal and transverse optical vibrations in lithium niobate single crystals. *Inorg. Mater.*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1104–1110. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168515100076>
- [19] Gorelik V.S., Yashin M.M. Narrow-band filters in the visible spectral range based on porous photonic crystal. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2016, no. 5 (68), pp. 105–114 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-5-105-114>
- [20] Gorelik V.S., Loboiko A.A. Photoluminescence spectra of $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$. *Inorg. Mater.*, 2019, vol. 55, no. 8, pp. 827–833. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168519070069>

Aliyev I.N. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Yashin M.M. — Assistant, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Senior Lecturer, Department of Nanoelectronics, RTU MIREA (prospekt Vernadskogo 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

Loboiko A.A. — Assistant, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gorbatova O.O. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Lyatifov R.E. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aliyev I.N., Yashin M.M., Loboiko A.A., et al. Spectroscopic properties study of photonic crystals and nanostructures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 2 (107), pp. 35–49 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-2-35-49>