

13 Датчик малых перемещений на основе одномерного фотонного кристалла с дефектом

© А.И. Сидоров¹, М.В. Махаева²

¹ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: sidorov@oi.ifmo.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023 г.

В окончательной редакции 14.04.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Представлены результаты численного моделирования оптических свойств одномерного (1D) фотонного кристалла (ФК) с дефектом на основе слоев Si-SiO₂ в ближнем ИК диапазоне. Оптическая толщина слоев, образующих ФК, составляла $\lambda/4$, $3\lambda/4$ и $10\lambda/4$. Дефект был образован воздушным зазором в середине ФК. Изучено влияние толщины дефекта на спектральное положение полосы пропускания дефекта. Показано, что чувствительность к толщине дефекта d лежит в пределах $\Delta\lambda/\Delta d = 330-1200 \text{ nm}/\mu\text{m}$ и $0.6-0.85 \text{ dB/nm}$, в зависимости от геометрии датчика и метода измерений. Это делает 1D ФК с дефектом перспективными для использования в датчиках малых перемещений в качестве чувствительного элемента.

Ключевые слова: датчик перемещений, фотонный кристалл, дефект, фотонная запрещенная зона, передающая матрица.

DOI: 10.21883/OS.2023.07.56133.4860-23

Введение

Измерение малых перемещений играет важную роль в высокотехнологичных отраслях. В частности, в процессе производства жидкокристаллических дисплеев (ЖК-дисплеев) и в производстве полупроводников. Существует ряд датчиков малых перемещений с высокой чувствительностью. Оптические датчики перемещений обеспечивают высокое разрешение. Они имеют высокую чувствительность и не чувствительны к электромагнитным наводкам. Примером является когерентный фотонный сканирующий туннельный микроскоп с разрешением 1.6 nm [1]. В нем используется гетеродинная интерферометрия, позволяющая измерять как фазу, так и амплитуду оптического ближнего поля. Другим примером является гомодинный поляризационный лазерный интерферометр для высокоскоростного измерения малых перемещений с разрешением 0.5 nm [2]. Датчик малых перемещений, описанный в [3], основанный на методе критического угла и конфокальном методе, имеет разрешение около 5 nm. В [4] показано, что при использовании геометрической оптики и плазмонного резонанса в металлических наночастицах можно получить нанометровое разрешение при измерении абсолютных расстояний. В то же время большинство датчиков малых перемещений имеют сложную конструкцию и высокую стоимость.

ФК и фотонно-кристаллические волокна широко используются в сенсорике [5–11]. ФК и волокна являются резонансными оптическими системами. Их спектральные и амплитудные характеристики зависят от внешних и внутренних изменений, таких как температура,

давление, двулучепреломление, наведенное полем, показатель преломления среды. Все эти эффекты могут быть использованы при разработке датчиков. ФК могут применяться для измерения температуры [12], показателя преломления среды [9], электрических и магнитных полей, механического напряжения, углов, в том числе для измерения малых перемещений. В [13,14] описаны датчики малых перемещений на основе фотонно-кристаллических волокон. Для создания 1D ФК могут быть использованы метаматериалы [15–17].

Если периодичность ФК нарушена дефектом, то может быть создана специфическая спектральная область с иными оптическими свойствами. Область дефекта может поддерживать моды с частотами внутри фотонной запрещенной зоны. Но так как полоса пропускания дефекта окружена фотонной запрещенной зоной, излучение внутри дефекта остается ограниченным. Как правило, полоса пропускания дефекта является очень узкой. Это позволяет создавать датчики с очень высокой чувствительностью.

Целью данной работы было изучение оптических свойств 1D ФК с дефектом с точки зрения возможности его использования в качестве датчика малых перемещений, а также рассмотрение влияния геометрии ФК на его чувствительность.

1. Геометрия ФК и методика численного моделирования

1D ФК состоит из 4 пар слоев Si-SiO₂ с дефектом в центре, представляющим собой воздушный зазор

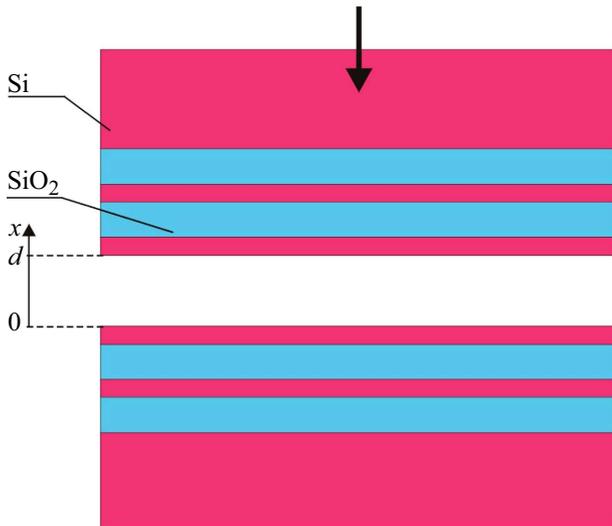


Рис. 1. Геометрия ФК с дефектом.

($n = 1$). Слои Si и SiO₂ имеют высокий контраст показателя преломления: $n = 3.4$ и 1.46 соответственно. Это позволяет использовать в ФК всего 4 пары слоев без ухудшения его оптических характеристик. Слои могут быть сформированы методом вакуумного напыления на кремниевых пластинах толщиной $1-2$ мм. Внешние поверхности кремниевых пластин должны иметь антиотражающие покрытия. Необходимо отметить, что внутренние поверхности кремниевых пластин участвуют в интерференционных процессах в ФК. При численном моделировании использовались три геометрии ФК. В первой геометрии оптическая толщина слоев была равна $\lambda/4$ для $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$. Во второй и третьей геометриях оптические толщины слоев были равны $3\lambda/4$ и $10\lambda/4$ соответственно. Толщина дефекта выбирается таким образом, чтобы фотонная запрещенная зона располагалась вблизи длины волны $1.5 \mu\text{m}$.

Для измерения перемещений одну половину ФК закрепляют неподвижно, а вторую устанавливают на перемещающийся объект. При перемещении объекта изменяется толщина дефекта. Так как изменение толщины дефекта приводит к спектральному сдвигу полосы пропускания дефекта ФК, то для измерения перемещения может быть использован спектральный сдвиг полосы пропускания дефекта. Для этих целей может быть использован спектрофотометр. Однако, для увеличения чувствительности и для уменьшения габаритов измерительной части датчика в нем предпочтительнее использовать, в качестве источника излучения, узкополосный перестраиваемый полупроводниковый DFB (Distributed Feedback) лазер. В этом случае в качестве фотоприемника может быть использован фотодиод. Второй метод основан на измерении пропускания фотонного кристалла на фиксированной длине волны, соответствующей длине волны зондирующего лазера.

Очевидно, что фотонный кристалл с геометрией, показанной на рис. 1, можно рассматривать как многослой-

ный интерферометр. Поэтому для моделирования его оптических свойств использовался метод передаточной матрицы [18]. В данном методе амплитуды полей на входе (E_{j-1}) и на выходе (E_j) границ слоев в общем виде описываются следующими матрицами:

$$\begin{bmatrix} E_{(j-1)-}^t \\ E_{(j-1)-}^r \end{bmatrix} = M_j \begin{bmatrix} E_{j-}^r \\ E_{j-}^t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_j = \begin{bmatrix} \frac{\exp(i\theta_j)}{g_{j-1}} & \frac{f_{j-1}}{g_{j-1}} \exp(-i\theta_j) \\ \frac{f_{j-1}}{g_{j-1}} \exp(i\theta_j) & \frac{\exp(-i\theta_j)}{g_{j-1}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь индекс „-“ соответствует отраженной волне, t и r соответствуют поперечной и радиальной составляющих волны, f и g — коэффициенты Френеля:

$$f_{j-1} = \frac{n_{j-1} - n_j}{n_{j-1} + n_j}, \quad g_{j-1} = \frac{2n_{j-1}}{n_{j-1} + n_j}. \quad (3)$$

Передаточная матрица определяется следующим выражением:

$$M = \prod_{j=1}^{m-1} M_j, \quad (4)$$

где m — число слоев.

При моделировании использовалась дисперсия оптических констант Si и SiO₂ из [19]. Поглощение в ФК не учитывалось. Моделирование проводилось для нормального падения излучения в среде Mathcad 15.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* показана фотонная запрещенная зона ФК с дефектом для различных толщин дефекта для ФК с оптической толщиной слоев, равной $\lambda/4$. Ширина запрещенной зоны примерно равна $1 \mu\text{m}$. Ширина по полувысоте полосы пропускания дефекта равна 8 nm . Увеличение толщины дефекта приводит к длинноволновому сдвигу полосы пропускания дефекта и уменьшению ширины запрещенной зоны. Из рисунка видно, что уменьшение ширины запрещенной зоны оказывает влияние в основном на спектральный сдвиг коротковолновой части запрещенной зоны. Этот эффект оказывает влияние и на спектральный сдвиг полосы пропускания дефекта. На рис. 2, *b* показана зависимость спектрального положения максимума полосы пропускания дефекта от толщины дефекта. Из рисунка видно, что зависимость линейна, а спектральная чувствительность измерений при оптической толщине слоев ФК, равной $\lambda/4$, составляет $\Delta\lambda/\Delta d = 1200 \text{ nm}/\mu\text{m}$.

На рис. 3, *a* показано спектральное положение полосы пропускания дефекта ФК при разной толщине дефекта и методика измерений при фиксированной длине волны. Из рисунка видно, что при увеличении толщины дефекта происходит длинноволновый сдвиг полосы дефекта. При этом, на длине волны, соответствующей максимуму

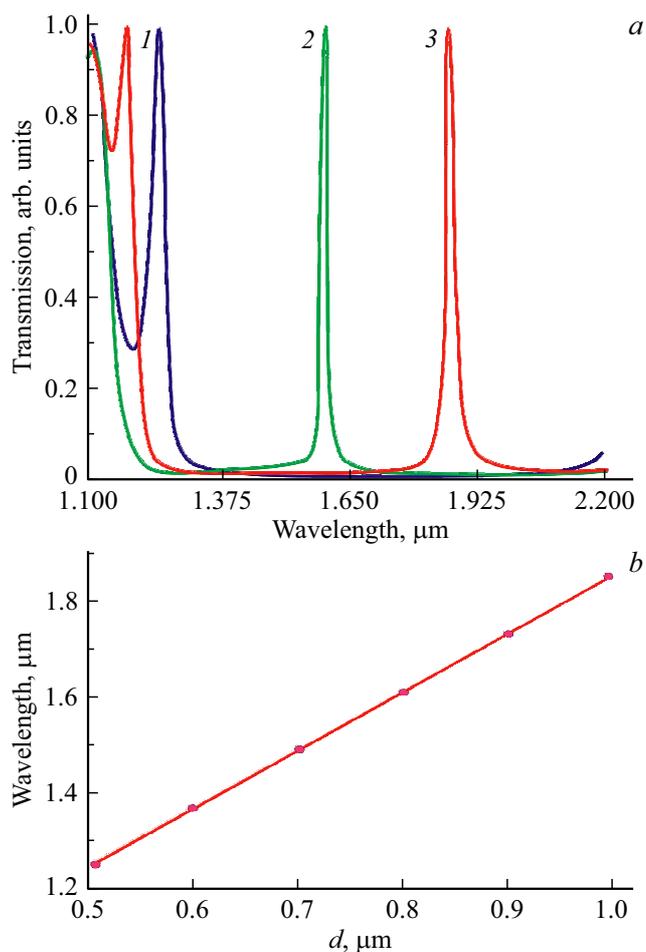


Рис. 2. *a* — спектр части фотонной запрещенной зоны ФК с дефектом. Оптическая толщина слоев ФК равна $\lambda/4$. $d = 0.5$ (1), 0.7 (2), $0.8 \mu\text{m}$ (3). *b* — зависимость спектрального положения максимума полосы пропускания дефекта от толщины дефекта.

пропускания полосы дефекта при исходной его толщине пропускание уменьшается. На рис. 3, *b* показана зависимость пропускания ФК от толщины дефекта при измерении на фиксированной длине волны. Как видно из рисунка при малом изменении толщины дефекта зависимость близка к линейной. По мере увеличения толщины зависимость становится более полой. Средняя амплитудная чувствительность измерений данным методом при оптической толщине слоев ФК, равной $\lambda/4$, составляет 0.61 dB/nm .

При увеличении оптической толщины слоев ФК от $\lambda/4$ до $3\lambda/4$ происходит уменьшение спектральной ширины фотонной запрещенной зоны ФК и уменьшение спектральной ширины полосы пропускания дефекта. Первый фактор приводит к уменьшению динамического диапазона измерений. Второй фактор — к увеличению амплитудной чувствительности измерений на фиксированной длине волны. На рис. 4 показаны спектральное положение полосы пропускания дефекта при разной

толщине дефекта и зависимость пропускания ФК от толщины дефекта при измерении на фиксированной длине волны для оптической толщины слоев ФК, равной $3\lambda/4$. Спектральная чувствительность измерений при оптической толщине слоев ФК, равной $3\lambda/4$, составляет $780 \text{ nm}/\mu\text{m}$. Средняя амплитудная чувствительность измерений, в данном случае, равна 0.76 dB/nm .

При дальнейшем увеличении оптической толщины слоев ФК, до $10\lambda/4$ также происходит уменьшение спектральной ширины фотонной запрещенной зоны ФК и уменьшение спектральной ширины полосы пропускания дефекта. Как и в предыдущем случае, первый фактор приводит к уменьшению динамического диапазона измерений. Второй фактор — к увеличению амплитудной чувствительности измерений на фиксированной длине

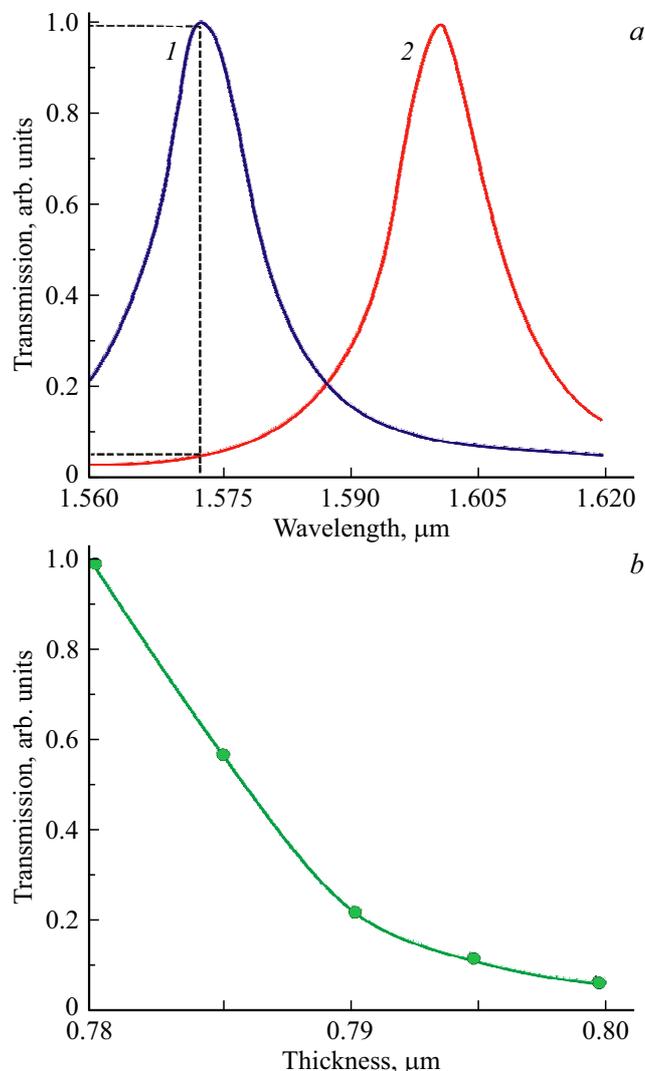


Рис. 3. *a* — спектральное положение полосы пропускания дефекта при разной толщине дефекта и методика измерений при фиксированной длине волны. $d = 0.78$ (1), $0.8 \mu\text{m}$ (2). *b* — зависимость пропускания ФК от толщины дефекта при измерении на фиксированной длине волны $\lambda = 1.574 \mu\text{m}$ (отмечена штриховой линией на рис. 3, *a*). Оптическая толщина слоев ФК равна $\lambda/4$.

волны. Кроме того, у ФК появляются несколько запрещенных зон. Это упрощает выбор рабочей длины волны. Кроме того, это дает возможность проводить измерения на нескольких длинах волн одновременно. На рис. 5 показаны спектральное положение полосы пропускания дефекта при разной толщине дефекта и зависимость пропускания ФК от толщины дефекта при измерении на фиксированной длине волны для оптической толщины слоев ФК, равной $10\lambda/4$. Спектральная чувствительность измерений составляет $327 \text{ nm}/\mu\text{m}$. Средняя амплитудная чувствительность измерений в данном случае равна $0.85 \text{ dB}/\text{nm}$.

Таким образом, увеличение оптической толщины слоев ФК приводит к уменьшению спектральной чувствительности измерений, но сопровождается увеличением чувствительности амплитудных измерений.

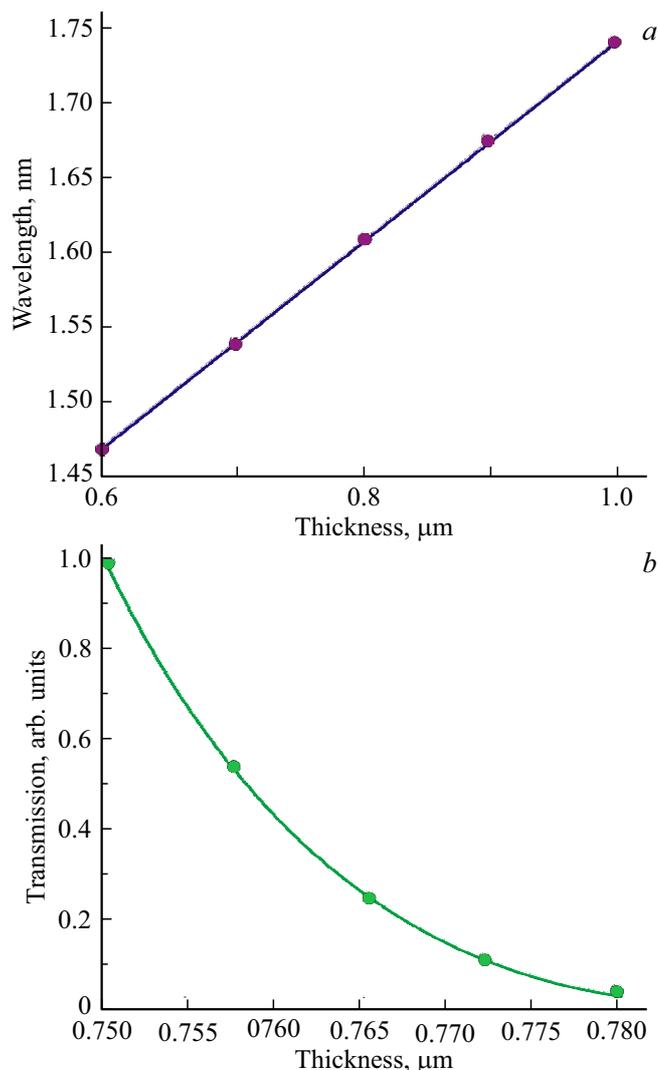


Рис. 4. *a* — спектральное положение полосы пропускания дефекта при $d = 0.78$ (1), $0.8 \mu\text{m}$ (2). *b* — зависимость пропускания ФК от толщины дефекта при измерении на фиксированной длине волны $\lambda = 1.562 \mu\text{m}$. Оптическая толщина слоев ФК равна $3\lambda/4$.

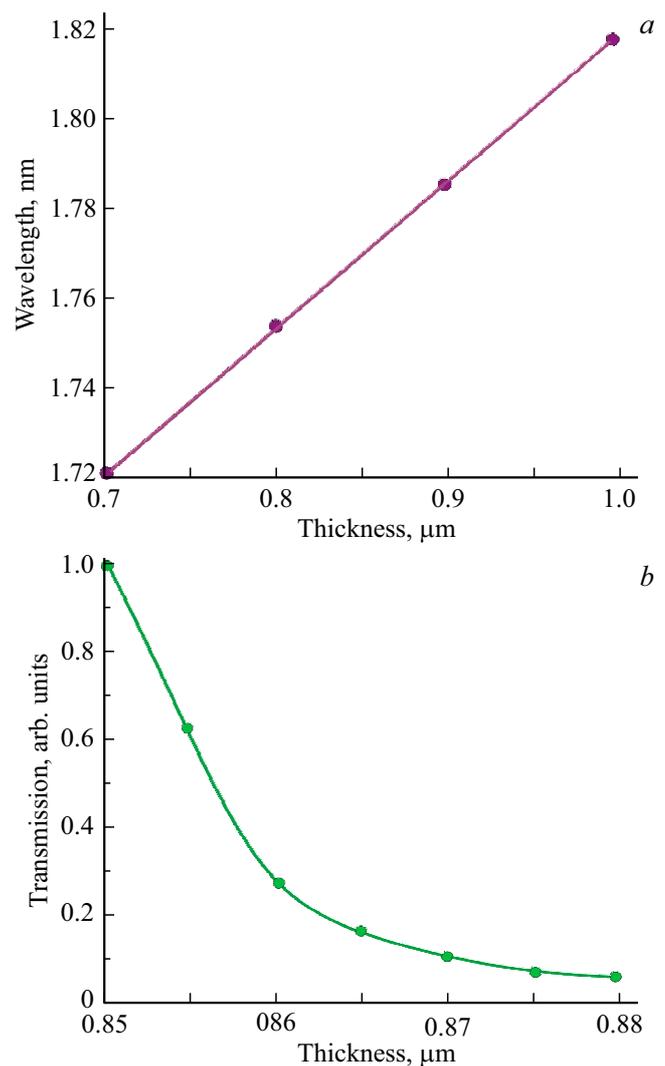


Рис. 5. Зависимости спектрального положения максимума полосы пропускания дефекта (*a*) и пропускания ФК на фиксированной длине волны $\lambda = 1.766 \mu\text{m}$ (*b*) от толщины дефекта. Оптическая толщина слоев ФК равна $10\lambda/4$.

Заключение

Численное моделирование оптических свойств 1D фотонного кристалла с дефектом, состоящего из слоев кремния и оксида кремния и дефектом в виде воздушного зазора, показало, что такой фотонный кристалл может быть использован в качестве датчика малых перемещений. Эффект основан на спектральном сдвиге полосы пропускания дефекта при изменении толщины дефекта. Максимальная чувствительность при измерении спектрального сдвига составляет $1200 \text{ nm}/\mu\text{m}$ для фотонного кристалла с оптической толщиной слоев $\lambda/4$. Максимальная чувствительность при измерении на фиксированной длине волны составляет $0.85 \text{ dB}/\text{nm}$ для фотонного кристалла с оптической толщиной слоев $10\lambda/4$. Датчик может работать как в режиме пропускания, так и в режиме отражения. Чувствительный элемент может

быть расположен на расстоянии от измерительной части датчика.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке программой „Приоритет 2030“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Nesci, R. Dändliker, H.P. Herzig. *Opt. Lett.*, **26**, 208 (2001). DOI: 10.1364/ol.26.000208
- [2] X. Liu, W. Clegg, D.F.L. Jenkins, B. Liu. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **50**, 868 (2001). DOI: 10.1109/19.948290
- [3] S.J. Liao, S.F. Wang, M.H. Chiu. *SPIE*, **5635**, 211 (2005). DOI: 10.1117/12.572739
- [4] M.H. Chiu, B.Y. Shih, C.W. Lai, L.H. Shyu, T.H. Wu. *Sens. Act. A*, **141**, 217 (2008). DOI: 10.1364/AO.54.002885
- [5] J.B. Markowski. *ES 530B: Res. Proj., Hindawi Publ. Corp.*, **17**, 535 (2008).
- [6] A.M.R. Pinto, M. Lopez-Amo. *J. Sens.*, **2012**, 598178 (2012). DOI: 10.1155/2012/598178
- [7] S. Upadhyay, V.L. Kalyan. *Intern. J. Eng. Res. Techn.*, **4**, 1006 (2015). DOI: 10.1007/s11468-019-00934-9
- [8] Z. Baraket, J. Zaghoudi, M. Kanzari. *Opt. Mater.*, **64**, 147 (2017). DOI: 10.1016/J.OPTMAT.2016.12.005
- [9] A.I. Sidorov, L.A. Ignatieva. *Optik*, **245**, 167685 (2021). DOI: 10.1016/j.jjleo.2021
- [10] E. Chow, A. Grot, L.W. Mirkarimi, M. Sigalas, G. Girolami. *Opt. Lett.*, **29**, 1093 (2004). DOI: 10.1364/OL.29.001093
- [11] W.C.L. Hopman, P. Pottier, D. Yudistira, J. van Lith, P.V. Lambeck, R.M. de la Rue, A. Driessen, H.J.W.M. Hoekstra, R.M. de Ridder. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, **11**, 11 (2005). DOI: 10.1109/JSTQE.2004.841693
- [12] А.И. Сидоров, Ю.О. Видимина. *Опт. и спектр.*, **130** (9), 166 (2022). [A.I. Sidorov, Yu.O. Vidimina. *Opt. Spectrosc.*, **130** (9), 158 (2022).]
- [13] A.M.R. Pinto, J.M. Baptista, J.L. Santos, M. Lopez-Amo, O. Frazão. *Fiber Sensors*, **12**, 17497 (2012). DOI: 10.3390/s121217497
- [14] J.N. Dash, R. Jha, J. Villatoro, S. Dass. *Opt. Lett.*, **40**, 467 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.000467
- [15] H. Wang, S. Chen, S. Zhu. *Phys. Rev. B*, **70**, 245102 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevB.70.245102
- [16] H. Jiang, H. Chen, H. Li, Y. Zhang, J. Zi, S. Zhu. *Phys. Rev. E*, **69**, 066607 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066607
- [17] F. Wu, T. Liu, M. Chen, S. Xiao. *Opt. Expr.*, **30**, 33911 (2022). DOI: 10.1364/OE.469368
- [18] M. Born, E. Wolf. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (Cambridge University, 2000).
- [19] E.D. Palik. *Handbook of optical constants of solids* (Academic press, San Diego, 1998), v. 3.