

Датчик угла поворота на основе одномерного фотонного кристалла с дефектом

© А.И. Сидоров^{1,2}, А.А. Ефимов²

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 26.01.2023 г.

В окончательной редакции 26.01.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Представлены результаты численного моделирования оптических свойств одномерного (1D) фотонного кристалла с дефектом на основе слоев полупроводник-диэлектрик в ближнем ИК диапазоне. При моделировании использовались слои кремния и диоксида кремния с оптической толщиной $3\lambda/4$, $\lambda/4$ и $10\lambda/4$. Изучено влияние угла падения излучения на спектральное положение полосы пропускания дефекта. Показано, что чувствительность к углу поворота лежит в пределах 6–20 nm/deg и 1.7–5.5 dB/deg в зависимости от геометрии датчика и метода измерений. Это делает данные фотонные кристаллы перспективными для использования в датчиках угла поворота в качестве чувствительного элемента.

Ключевые слова: датчик угла поворота, угол падения, фотонный кристалл, фотонная запрещенная зона, передаточная матрица.

DOI: 10.21883/OS.2023.07.56141.4568-23

Введение

Датчики угла поворота широко используются в индустрии, мониторинге конструкций и строений, транспорте, робототехнике и других областях человеческой деятельности. В настоящее время существует огромное количество датчиков угла, основанных на различных физических процессах [1]. Большинство из них основано на механических, электрических, магнитных и оптических эффектах [2–7]. Датчики угла поворота могут быть также использованы для определения смещения, углов изгиба и скручивания. Оптические датчики угла обеспечивают высокое разрешение. Они имеют высокую чувствительность и не чувствительны к электромагнитным наводкам.

Фотонные кристаллы и фотонно-кристаллические волокна широко используются в сенсорике [8–14]. Они применяются для измерения температуры, показателя преломления среды, электрических и магнитных полей, механического напряжения, углов и т.д. Фотонные кристаллы и волокна являются резонансными оптическими системами. Их спектральные и амплитудные характеристики зависят от внешних и внутренних изменений, таких как температура, давление, двулучепреломление, наведенное поле, показатель преломления среды. Все эти эффекты могут быть использованы при разработке датчиков. Например, как показано в [15], сила связи между внутренними резонансными оптическими модами фотонного кристалла зависит от угла падения излучения. Это может быть использовано для измерения угла падения путем измерения интенсивности прошедшего излучения. При использовании мод с высокой доб-

ротностью чувствительность такого устройства может достигнуть максимума.

Если периодичность фотонного кристалла 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-фотонного кристалла с дефектом с точки зрения возможности его использования в качестве датчика угла поворота, а также рассмотрение влияния геометрии фотонного кристалла на его угловую чувствительность.

Геометрия фотонного кристалла и методика численного моделирования

1D-фотонный кристалл состоит из 4 пар слоев Si–SiO₂ с дефектом из SiO₂ в центре (рис. 1). Слои Si и SiO₂ имеют высокий контраст показателя преломления: 3.4 и 1.46 соответственно. Это позволяет использовать в фотонном кристалле всего 4 пары слоев без ухудшения его оптических характеристик. Слои могут быть сформированы методом вакуумного напыления на кремниевых пластинах толщиной 1–2 мм. Верхняя

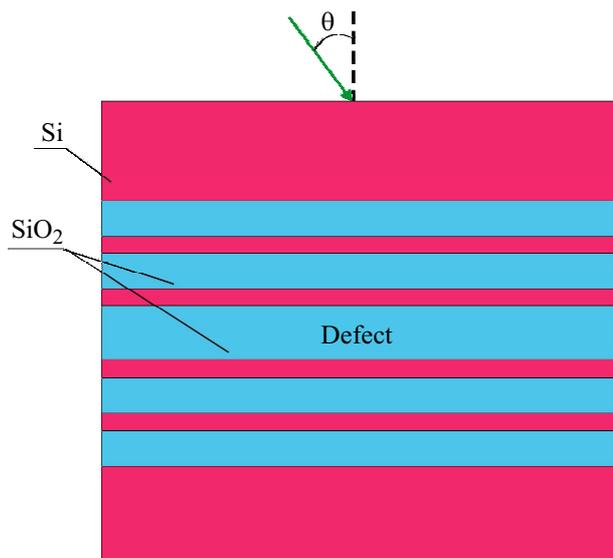


Рис. 1. Геометрия 1D фотонного кристалла с дефектом.

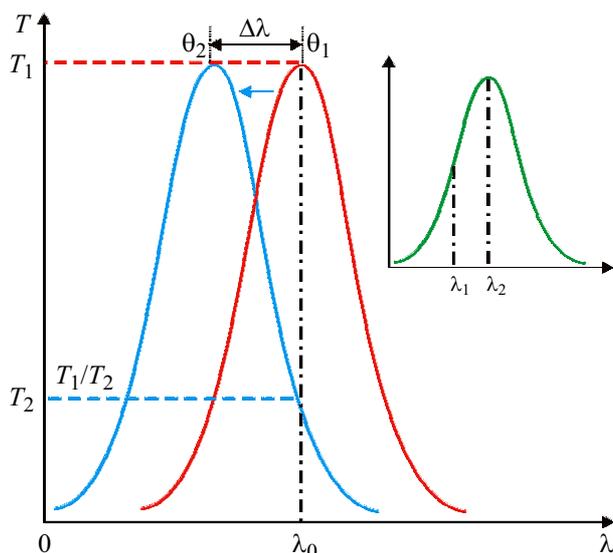


Рис. 2. Два метода измерения угла падения (пояснения в тексте).

кремниевая пластина может быть соединена с фотонным кристаллом с помощью иммерсионного слоя. Внешние поверхности кремниевых пластин должны иметь антиотражающие покрытия. Необходимо отметить, что внутренние поверхности кремниевых пластин участвуют в интерференционных процессах в фотонном кристалле. При численном моделировании использовались две геометрии фотонного кристалла. В первой геометрии оптическая толщина слоев была равна $\lambda/4$ для $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$. Для слоев Si это $0.118 \mu\text{m}$, а для слоев SiO₂ — $0.274 \mu\text{m}$. Толщина слоя дефекта равна $0.7 \mu\text{m}$. Во второй геометрии оптическая толщина слоев была равна $10\lambda/4$, а толщина слоя дефекта — $7 \mu\text{m}$.

На рис. 2 показаны два метода измерения угла падения θ . Так как изменение угла падения приводит к спектральному сдвигу полосы пропускания дефекта фотонного кристалла, то для определения изменения угла падения может быть использован спектральный сдвиг $\Delta\lambda$ 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 лазер. В этом случае в качестве фотоприемника может быть использован фотодиод. Второй метод основан на измерении пропускания фотонного кристалла на фиксированной длине волны λ_0 , соответствующей длине волны зондирующего лазера. Однако в этом случае возникает неопределенность в определении знака угла поворота. Для устранения этой неопределенности могут быть использованы два зондирующих лазера с разными длинами волн (вставка на рис. 2).

Численное моделирование проводилось с использованием передаточной матрицы [16]. В данном методе амплитуды полей на входе (E_{j-1}) и на выходе (E_j) границ слоев в общем виде описываются следующими матрицами:

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

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

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 [17]. Поглощение в фотонном кристалле не учитывалось. Для углов падения менее 15° результаты вычислений не зависят от поляризации падающего излучения. Поэтому ниже приведены результаты только для ТМ поляризации излучения. При численном моделировании использовался Mathcad 15.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показана фотонная запрещенная зона фотонного кристалла с дефектом с оптической толщиной

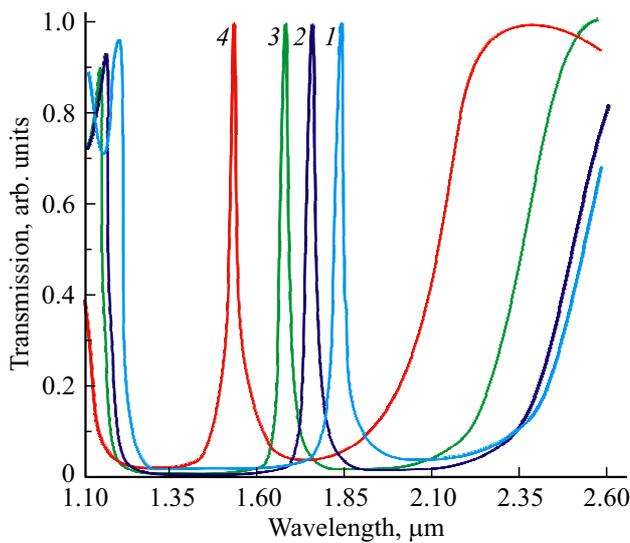


Рис. 3. Зависимость спектрального положения полосы пропускания дефекта от угла падения излучения. $\theta = 0^\circ$ (1), 5° (2), 10° (3), 15° (4). Оптическая толщина слоев — $\lambda/4$.

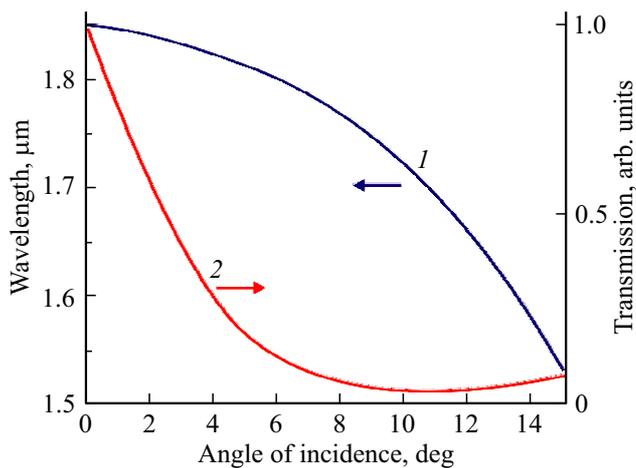


Рис. 4. Зависимость спектрального положения максимума полосы пропускания дефекта (1) и пропускания (2) от угла падения излучения для фиксированной длины волны. Оптическая толщина слоев $\lambda/4$.

слоев $\lambda/4$ для различных углов падения излучения. Ширина запрещенной зоны для $\theta = 0^\circ$ равна $1.35 \mu\text{m}$. Ширина полосы пропускания дефекта на полувысоте равна 30 nm . Увеличение угла падения излучения приводит к коротковолновому сдвигу полосы пропускания дефекта и уменьшению ширины запрещенной зоны. Из рисунка видно, что уменьшение ширины запрещенной зоны оказывает влияние в основном на спектральный сдвиг длинноволновой части запрещенной зоны. Этот эффект оказывает влияние и на спектральный сдвиг полосы пропускания дефекта.

На рис. 4 (кривая 1) показано влияние угла падения на спектральное положение максимума полосы пропускания дефекта. Из рисунка видно, что крутизна

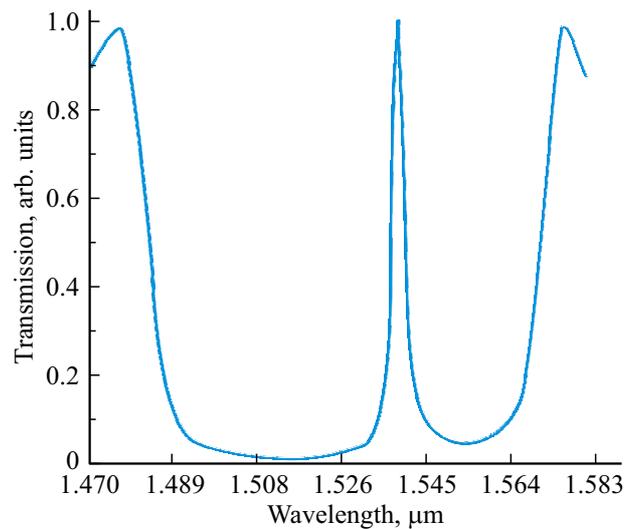


Рис. 5. Спектральное положение полосы пропускания дефекта для угла падения 0° (оптическая толщина слоев $10\lambda/4$).

зависимости растет при увеличении угла падения. Средняя чувствительность к изменению угла падения для фотонного кристалла с данной геометрией составляет 20 nm/deg для диапазона углов $0 < \theta < 15^\circ$.

На рис. 4 (кривая 2) показано влияние угла падения на коэффициент пропускания фотонного кристалла на фиксированной длине волны излучения. Эта длина волны соответствует максимуму полосы пропускания дефекта для $\theta = 0^\circ$. Из рисунка видно, что максимальная крутизна зависимости соответствует диапазону углов падения $0 < \theta < 9^\circ$. Для данного диапазона углов зависимость близка к линейной. Чувствительность пропускания к изменению угла падения для диапазона углов $0 < \theta < 5^\circ$ для фиксированной длины волны составляет 1.7 dB/deg . Для $\theta > 12^\circ$ наблюдается слабое увеличение пропускания. Оно вызвано спектральным сдвигом длинноволнового края фотонной запрещенной зоны к длине волны измерений.

Рассмотрим влияние толщины слоев фотонного кристалла на его спектральные характеристики и чувствительность. На рис. 5 показана фотонная запрещенная зона фотонного кристалла с дефектом для оптической толщины слоев $10\lambda/4$, толщины слоя дефекта $7 \mu\text{m}$ и угла падения $\theta = 0^\circ$. Из рисунка видно, что ширина фотонной запрещенной зоны равна $0.089 \mu\text{m}$. Ширина полосы пропускания дефекта равна 4 nm .

На рис. 6 (кривая 1) показано влияние угла падения на спектральное положение максимума полосы пропускания дефекта. Из рисунка видно, что крутизна зависимости растет при увеличении угла падения. Средняя чувствительность к изменению угла падения для фотонного кристалла с данной геометрией составляет 6 nm/deg для диапазона углов $0 < \theta < 6^\circ$. Максимальная крутизна зависимости наблюдается в диапазоне углов $0 < \theta < 1.6^\circ$. Для этого диапазона углов зависимость

Сравнение оптических свойств и средней чувствительности для двух геометрий 1D фотонного кристалла

Толщина слоев и дефекта, μm	Ширина фотонной запрещенной зоны, μm	Ширина дефекта, nm	Чувствительность nm/deg, диапазон углов	Чувствительность dB/deg, диапазон углов
$\lambda/4$; $0.7 \mu\text{m}$	1.35	30	20; $0 < \theta < 15$	1.7; $0 < \theta < 5$
$10\lambda/4$; $7 \mu\text{m}$	0.089	4	6; $0 < \theta < 6$	5.5; $0 < \theta < 1.5$

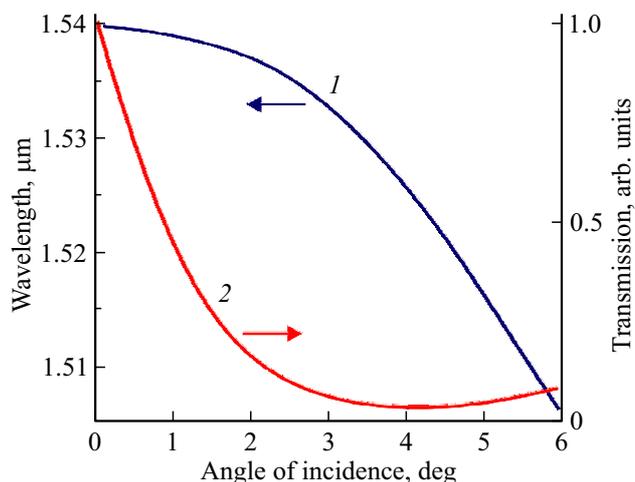


Рис. 6. Зависимости спектрального положения максимума полосы пропускания дефекта (1) и пропускания (2) от угла падения излучения. Оптическая толщина слоев $10\lambda/4$.

примерно линейна. Чувствительность пропускания к изменению угла падения для фиксированной длины волны в диапазоне углов падения $0 < \theta < 1.6^\circ$ равна 5.5 dB/deg (рис. 6, кривая 2).

Сравнение оптических свойств и средней чувствительности для двух геометрий 1D фотонного кристалла с дефектом показано в таблице. Из таблицы видно, что увеличение оптической толщины слоев приводит к уменьшению спектральной ширины фотонной запрещенной зоны, ширины полосы пропускания дефекта и диапазона углов измерений. Максимальную чувствительность измерения углов для первого метода измерений имеет фотонный кристалл с толщиной слоев $\lambda/4$. Максимальную чувствительность измерения углов для второго метода измерений имеет фотонный кристалл с толщиной слоев $10\lambda/4$. В последнем случае может быть измерен угол 0.07° , что близко к чувствительности датчика углов на основе графена [18] и датчика углов на основе 2D фотонного кристалла [15].

Заключение

Численное моделирование оптических свойств 1D фотонного кристалла с дефектом, состоящего из слоев кремния и оксида кремния, показало, что такой фотонный кристалл может быть использован в качестве датчика угла поворота. Эффект основан на спектральном

сдвиге полосы пропускания дефекта при изменении угла падения. Максимальная чувствительность при измерении спектрального сдвига составляет 20 nm/deg для фотонного кристалла с оптической толщиной слоев $\lambda/4$. Максимальная чувствительность при измерении на фиксированной длине волны составляет 5.5 dB/deg 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.S.A. Kumar, B. George, S.C. Mukhopadhyay. IEEE Sens. J. **21**, 7195 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2020.3045461
- [2] A.H. Falkne. IEEE Trans. Instrum. Meas. **43**, 939 (1994).
- [3] E.B. Mohammed, M. Rehman. IEE Proc.—Sci., Meas. Technol., **150**, 15–18 (2003).
- [4] B.P. Reddy, A. Murali, G. Shaga. in Proc. 2nd Int. Conf. Frontiers Sensors Technol. (ICFST), Shenzhen, China, 14 (2017).
- [5] C. Schott, R. Racz, S. Huber. Sens. Actuators A, Phys. **132**, 165 (2006).
- [6] M. Shan, R. Min, Z. Zhong, Y. Wang, Y. Zhang. Opt. Laser Technol. **68**, 124 (2015). DOI: 10.1007/s12647-020-00410-4
- [7] D. Sagrario, P. Mead. Appl. Opt., **37**, 6748 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.006748
- [8] J.B. Markowski. ES 530B: Res. Proj., Hindawi Publ. Corp. 17 (2008).
- [9] A.M.R. Pinto, M. Lopez-Amo. J. Sens., **2012**, 598178 (2012). DOI: 10.1155/2012/598178
- [10] S. Upadhyay, V.L. Kalyan. Intern. J. Eng. Res. Technol., **4**, 1006 (2015). DOI: 10.1007/s11468-019-00934-9
- [11] Z. Baraket, J. Zaghdoudi, M. Kanzari. Opt. Mater. **64**, 147 (2017). DOI: 10.1016/J.OPTMAT.2016.12.005
- [12] A.I. Sidorov, L.A. Ignatieva. Optik **245**, 167685 (2021). DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.
- [13] E. Chow, A. Grot, L.W. Mirkarimi, M. Sigalas, G. Girolami. Opt. Lett., **29**, 1093 (2004). DOI: 10.1364/OL.29.001093

- [14] 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
- [15] B. Neil, X. Chen, J. McCann, C. Blair, J. Li, C. Zhao, D. Blair. *Opt. Expr.*, **29**, 15413 (2021). DOI: 10.1364/OE.425433
- [16] M. Born, E. Wolf. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (Cambridge University, 2000).
- [17] E.D. Palik. *Handbook of optical constants of solids*. V. 3 (Academic Press, San Diego, 1998).
- [18] Y. Chen, Y. Fan, Z. Zhang, Z. Zhu, K. Liu, J. Zhang, W. Xu, C. Guo. *Opt. Expr.*, **29**, 41206 (2021). DOI: 10.1364/OE.443842