

Спектральный штрихкод на основе одномерного фотонного кристалла с непрерывной модуляцией показателя преломления

С. Е. Свяховский,^{1,*} Н. И. Пышков¹

¹Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 27.04.2023; после доработки 12.05.2023; принята к публикации 14.05.2023)

В работе продемонстрирован пример оптического кодирования информации при помощи спектрального отклика фотонного кристалла. Спектральная зависимость коэффициента отражения одномерного фотонного кристалла воспроизводит последовательность штрихкода стандарта EAN-13. Разработан алгоритм построения структуры фотонного кристалла исходя из заданной кодируемой последовательности 12 цифр. Эта структура была экспериментально реализована, её спектральный отклик позволяет расшифровать исходную закодированную последовательность.

PACS: 42.70.Qs, 42.70.Ln. УДК: 535.44

Ключевые слова: фотонные кристаллы, спектроскопия, пористый кремний, спектральное кодирование.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2340402](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2340402)

ВВЕДЕНИЕ

Спектральный диапазон видимого света не ограничивается тем, что может видеть человеческий глаз. При помощи аппаратуры с достаточно высоким спектральным разрешением можно, помимо цвета, получить огромное количество информации о химическом составе при помощи спектров комбинационного рассеяния [1], о кристаллической структуре путём измерения нелинейно-оптических свойств [2], фазовом состоянии вещества [3]. Естественным образом возникает идея не только считывать, но также записывать и хранить информацию в спектральном отклике.

Идея оптического кодирования информации известна давно, но при этом она не теряет актуальности по сей день. Сегодня на каждом товаре имеется уникальный штрихкод, который легко считывается при помощи соответствующего устройства. Многократно демонстрируются попытки сделать спектральный аналог оптического штрихкода, встречаются реализации на основе квантовых точек [4], спектров комбинационного рассеяния [5], гигантского комбинационного рассеяния на наночастицах [6]. Большую популярность в решении этой задачи имеют флуоресцентные метки [7, 8], нанотрубки с особым спектральным откликом [9] и графеновые наноматериалы [10]. Спектральные штрихкоды предлагается использовать для защиты лекарств от подделок [11], оптического кодирования информации [12, 13] и множества других применений [13].

В этой работе для примера спектрального кодирования информации используется знакомый каж-

дому штрихкод стандарта EAN-13. Штрихкод позволяет записать последовательность из 12 значащих цифр и одной контрольной, этот штрихкод применяется для маркировки продуктов. Выполнялось спектральное кодирование штрихкода, в котором записана последовательность 123456789012, контрольная цифра при этом была 8. Эта последовательность была выбрана, потому что в ней присутствуют все возможные цифры. Штрихкод показан на рис. 1. Штрихкод состоит из последовательности чёрных линий разной ширины, информация кодируется при помощи толщины линии. В стандарте EAN-13 ширина линии может иметь 4 значения, поэтому для кодирования информации понадобится некоторая элементарная единица, принимающая 4 возможных значения.



Рис. 1. Штрихкод EAN-13, в котором закодирована последовательность 123456789012 и контрольная цифра 8

1. КОДИРОВАНИЕ ШТРИХКОДА В ВИДЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Известно, что фотонный кристалл, имеющий гармоническую модуляцию показателя преломления,

* E-mail: sse@shg.ru

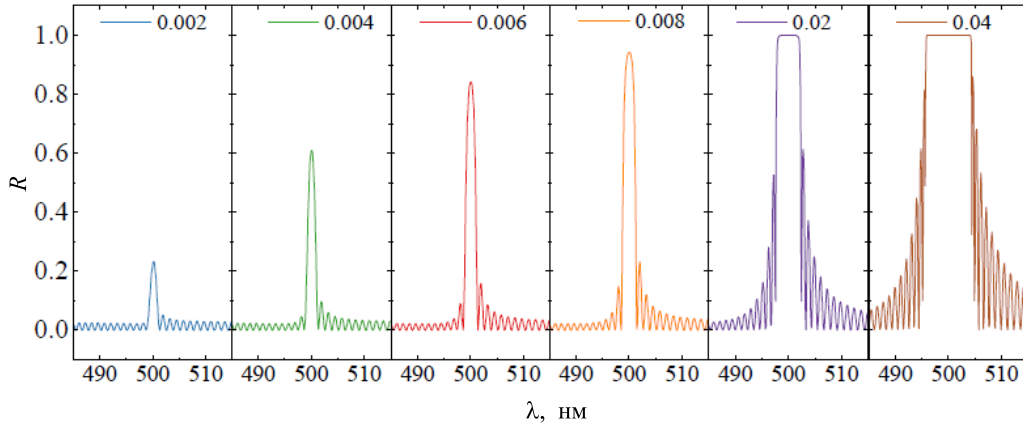


Рис. 2. Спектры коэффициентов отражения фотонных кристаллов с синусоидальной модуляцией показателя преломления при различных величинах амплитуды модуляции

имеет одну запрещённую зону, которая проявляется в спектре в виде полосы с высоким коэффициентом отражения, середина которой находится на длине волны, равной удвоенному оптическому периоду [14]. Ширина полосы пропорциональна амплитуде модуляции показателя преломления.

Рассмотрим одномерный фотонный кристалл толщиной $L = 100$ мкм, средний показатель преломления которого $n_0 = 1.18$. Пусть координата x означает глубину вдоль кристалла. Введём пространственную модуляцию показателя преломления по гармоническому закону вида:

$$n(x) = n_0 + A \sin(kx + \phi_0) \quad (1)$$

где k — вектор обратной решетки, ϕ_0 — начальная фаза, A — амплитуда модуляции. Выберем вектор обратной решетки $k = 4\pi/\lambda_0$, где примем $\lambda_0 = 500$ нм. Вычислим спектр коэффициента отражения этой структуры при различных значениях амплитуды модуляции (рис. 2).

В спектрах присутствует фотонная запрещённая зона в виде максимума отражения, центр максимума лежит на длине волны $\lambda_0 = 500$ нм. При малых амплитудах модуляции величина максимума незначительна. По мере роста величины модуляции спектральный максимум вначале растёт по высоте, а достигнув единицы примерно при $A = 0.001$, увеличивается в ширину. При больших величинах амплитуды модуляции начинают расти боковые осцилляции.

Несмотря на то, что в штрихкоде информация кодируется шириной линии, использовать ширины запрещённых зон для кодирования информации нерационально, поскольку широкая ФЗЗ занимает большой участок в спектре. Помимо этого, боковые осцилляции могут влиять на соседние спектральные диапазоны и перекрывать другие максимумы. Поэтому следует ограничить величину модуляции значением, при котором величина спектрального максимума достигает единицы. В качестве величины, которая кодирует информацию, в данном

случае следует использовать амплитуду спектрального максимума. На рис. 2 первые четыре спектральных максимума могут быть использованы для кодирования толщины линии штрихкода. Таким образом, далее амплитуды гармонических функций модуляции показателя преломления будут иметь четыре дискретных значения, соответствующие толщине линий, $A^{(j)} = j \cdot a$. Коэффициент a будет определяться далее.

Алгоритм кодирования штрихкода в спектральную последовательность состоял в следующем:

1. Пусть штрихкод состоит из N линий. Вдоль штрихкода вводится координатная ось Oy , за нуль принимается левый край левой линии, за единицу правый край правой линии.
2. Определяются координаты правого края каждой линии y_i и толщины каждой линии. В соответствии с толщиной линии ей ставится в соответствие одно из четырёх значений амплитуды A_i
3. Выбирается рабочий спектральный диапазон $\{\lambda_{min}, \lambda_{max}\}$ Внутри этого диапазона выбираются базовые длины волн λ_i согласно правилу

$$\lambda_i = \lambda_{min} + (\lambda_{max} - \lambda_{min})y_i \quad (2)$$

4. Вычисляется профиль показателя преломления

$$n(x) = n_0 + \sum_{i=1}^N A_i \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_i}x + \phi_i\right), \quad (3)$$

где начальная фаза определяется как $\phi_i = i/N \cdot 2\pi$.

По этому алгоритму была закодирована последовательность 123456789012. На рис. 3 приведены примеры выполнения алгоритма при трёх значениях амплитудного коэффициента a . При $a = 0.001$

и $a = 0.002$ спектральные максимумы отчётливо видны, при дальнейшем повышении коэффициента до 0.003 отдельные максимумы достигают единицы и начинают уширяться. Для дальнейшей работы было выбрано наибольшее значение $a = 0.0021$, при котором максимумы не достигают единичного значения.

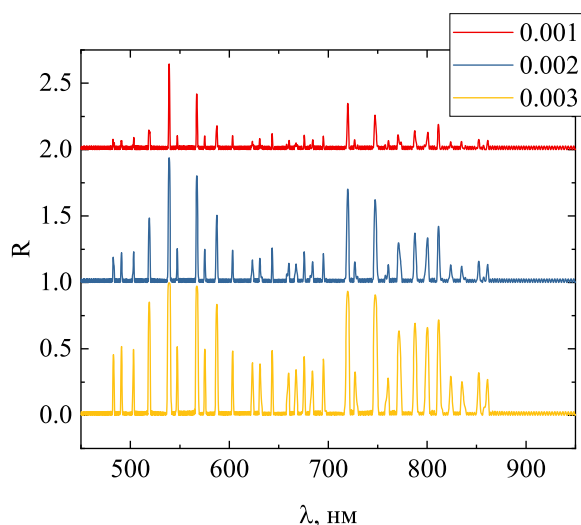


Рис. 3. Спектры коэффициентов отражения фотонных структур, реализующих спектральную последовательность штрихкода при различных величинах коэффициента амплитуды модуляции показателя преломления a

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Для вычисления спектров коэффициентов отражения фотонных кристаллов с гармонической пространственной модуляцией, а также модуляцией суммой гармонических функций зависимость $n(x)$ дискретизировалась путём деления на интервалы шириной 10 нм, после чего спектры считались аналогично многослойным структурам при помощи метода матриц распространения [15]. Изготовление экспериментальных образцов фотонных кристаллов выполнялось при помощи электрохимического травления кремния, процедура детально описана в [16]. В этой работе использованы следующие параметры процесса травления: минимальная и максимальная плотности токов травления 40 мА/см² и 180 мА/см², концентрация плавиковой кислоты в растворе электролита 28%. Линейные спектры коэффициента отражения также измерялись по методике, описанной в [16].

Штрихкоды EAN-13 генерировались при помощи функции Barcode EAN-13 Create, входящей в программную среду LabVIEW. Распознавание штрихкодов выполнялось при помощи приложения Камера телефона Samsung M32.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ РАСШИФРОВКА

Был изготовлен экспериментальный образец толщиной $L = 100$ мкм, кодирующий последовательность 123456789012, с амплитудным коэффициентом $a = 0.0021$. На рис. 4, а показан теоретический спектр коэффициента отражения, на рис. 4, б — экспериментальный, который с хорошей точностью воспроизводит теоретический. Все спектральные максимумы присутствуют, их спектральное положение совпадает с расчётными с точностью до ширины максимума, амплитуды максимумов отличаются от теоретических незначительно.

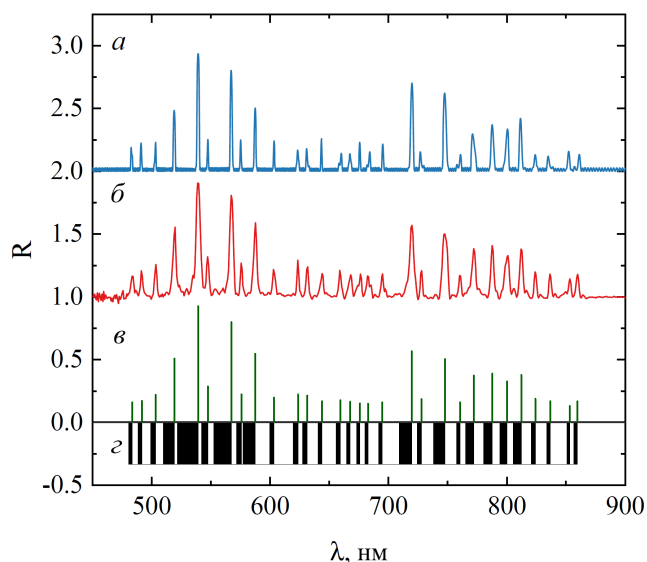


Рис. 4. а — вычисленный спектр коэффициента отражения фотонной структуры, реализующей требуемую спектральную последовательность, б — экспериментально измеренный спектр образца, в — автоматически распознанные максимумы экспериментального спектра, г — результат расшифровки штрихкода

Спектральная последовательность рис. 4, б подверглась расшифровке по следующему алгоритму:

- В автоматическом режиме при помощи функции Peak Detector VI пакета LabVIEW определялось спектральное положение и амплитуда максимумов. Результат работы функции показан на рис. 4, в.
- Точки, соответствующие координатам спектральных максимумов, наносились на белое изображение, длина волны максимума пропорционально пересчитывалась в номер пикселя изображения.
- Влево от каждой точки строилась чёрная полоса, ширина которой пропорциональна амплитуде максимума.

Результат работы алгоритма показан на рис. 4, г. Получившаяся последовательность чёрных и белых

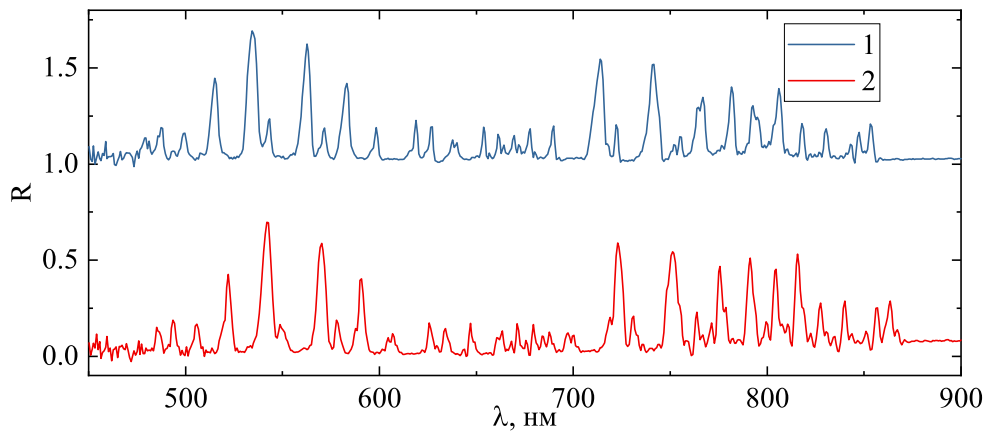


Рис. 5. Спектры коэффициентов отражения двух разных ПК, кодирующих одну и ту же последовательность штрихкода

полос может быть сосканирована непосредственно с экрана при помощи камеры смартфона.

На рис. 6 показано сравнение оригинального штрихкода (*a*) и результата его дешифровки по спектру экспериментального образца (*б*). Заметно, что некоторые линии имеют разное положение и ширину, однако это не мешает сканированию, оба штрихкода хорошо распознаются при помощи камеры или других мобильных приложений.

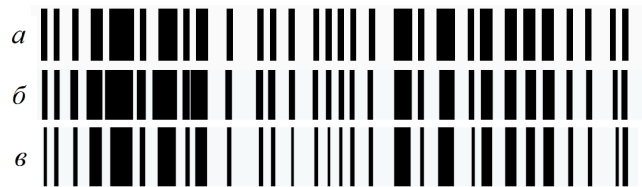


Рис. 6. Сравнение оригинального штрихкода *a* и результата его распознавания по спектру экспериментальных образцов 1 — *б* и 2 — *в*

4. ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целях установления воспроизводимости результатов были созданы два образца, структура которых соответствует исследуемой в настоящей работе последовательности штрихкода. На рис. 5 показаны их спектры коэффициента отражения. Видно, что последовательности имеют одинаковое число максимумов, соответствующих запрещённым зонам, их относительные спектральные положения и амплитуды соответствуют друг другу. Спектр образца 2 смещён в длинноволновую сторону на величину 9 нм относительно спектра образца 1. Это было вызвано нестабильностью концентрации раствора плавиковой кислоты в процессе травления. Однако для расшифровки последовательности штрихкода используются относительные положения спектральных максимумов, сдвиг по абсолютной величине на 9 нм не влияет на расшифровку сигнала. На рис. 6, *б*, *в* показаны штрихкоды, расшифрованные из спектров обоих образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе был продемонстрирован алгоритм спектрального кодирования штрихкода стандарта EAN-13 при помощи спектра коэффициента отражения одномерной фотонной структуры с гармонической модуляцией показателя преломления. Закодированная структура была создана экспериментально, был измерен её оптический спектр и успешно выполнена дешифровка спектральной последовательности.

Мы показали возможность спектрального кодирования информации при помощи спектров отражения одномерных фотонных структур. Предложенный метод может найти применение при создании уникальных меток, защите фотонных устройств от подделок, маркировки ценных материальных объектов. Помимо этого, представленный результат демонстрирует широкие возможности метода создания одномерных фотонных структур при помощи электрохимического травления кремния.

Авторы благодарят за финансовую поддержку этой работы Российский научный фонд, проект № 21-72-10103 (<https://rscf.ru/project/21-72-10103/>).

- [1] Lin S., Zhu W., Jin Y. et al. // *Nano letters*. **13**, 2. 559. (2013).
- [2] Dolgova T., Maidikovskii A., Martem'yanov M., et al. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. **73**. 6. (2001).
- [3] Murzina T.V., Sychev F.Y., Kolmychek I.A. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **90**, 16. 161120. (2007).
- [4] Mlinar V., Zunger A. // *Phys. Rev. B*. **80**, 3. 035328. (2009).
- [5] Lai Y., Sun S., He T. et al. // *RSC Advances*. **5**, 18. 13762. (2015).
- [6] Nguyen N.T.T., Yarak M.T., Wang Y. // *Molecular Systems Design & Engineering*. (2023).
- [7] Behnke T., Würth C., Hoffmann K. et al. // *J. of fluorescence*. **21**. 937. (2011).
- [8] Chaudhuri D., Li D., Che Y. et al. // *Nano letters*. **11**, 2. 488. (2011).
- [9] Clark K.A., Krueger E.L., Vanden Bout D.A. // *The J. of Phys. Chem. Lett.* **5**, 13. 2274. (2014).
- [10] Wang C., Qian J., Wang K. et al. // *ACS applied materials & interfaces*. **7**, 48. 26865. (2015).
- [11] Lawson L.S., Rodriguez J.D. // *Analytical chemistry*. **88**, 9. 4706. (2016).
- [12] Wu W., Yu X., Gao M. et al. // *Advanced Functional Materials*. **30**, 3. 1906707. (2020).
- [13] Shikha S., Salafi T., Cheng J. et al. // *Chemical Society Reviews*. **46**, 22. 7054. (2017).
- [14] Yariv A., Yeh P. // *Optical waves in crystals*. Wiley New York, 1984. ISBN: 978-0-471-43081-0
- [15] Luce A., Mahdavi A., Marquardt F. et al. // *JOSA A*. **39**, 6. 1007. (2022).
- [16] Svyakhovskiy S.E., Maydykovsky A.I., Murzina T.V. // *J. of Appl. Phys.* **112**, 1. 013106. (2012).

Spectral barcode based on one-dimensional photonic crystal with continuous refractive index modulation

S.E. Svyakhovskiy^a, N.I. Pyshkov

¹*Department of General Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^a*sse@shg.ru*

This paper demonstrates an example of optical information encoding using the spectral response of a photonic crystal. The spectral dependence of the reflection coefficient of a one-dimensional photonic crystal reproduces the sequence of the EAN-13 standard barcode. An algorithm for building the structure of a photonic crystal based on a given encoded sequence of 12 digits was developed. This structure was experimentally implemented, its spectral response allows to decode the original encoded sequence.

PACS: 42.70.Qs, 42.70.Ln.

Keywords: photonic crystals, spectroscopy, porous silicon, spectral coding.

Received 26 April 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 4. Pp. 484-488.

Сведения об авторах

1. Свяховский Сергей Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: sse@shg.ru.
2. Пышков Николай Иванович — аспирант.