

Формирование планарных световодов методом ионного осаждения для измерений спектров пропускания фотонных кристаллов из оксида кремния

В.Л. Лясковский^{1, *}

¹ *Институт перерабатывающей промышленности
Россия, 115093, Москва, ул. Щипок, д. 18*

(Поступила в редакцию 23.06.2026; после доработки 07.07.2026; подписана в печать 07.07.2026)

Квантовые информационные системы, такие как квантовые компьютеры и системы квантовой криптографии, получили активное развитие в последнее время. В таких системах для выполнения вычислительных и измерительных задач используются импульсы оптического излучения, состоящие из небольшого количества фотонов. Для уменьшения геометрических размеров измерительных, вычислительных и коммуникационных оптоэлектронных приборов используются микросхемы, созданные по планарным технологиям. Оптические элементы таких микросхем создаются в одном производственном процессе и образуют единую оптическую схему, но в процессе отладки или определения особенностей работы микросхемы может потребоваться измерение оптических параметров отдельных элементов таких микросхем. Настоящая работа посвящена исследованию процесса измерений спектральных параметров отдельных элементов оптических микросхем, изготовленных по планарной технологии. При измерении спектральных параметров предлагается осуществлять нанесение на подложку микросхемы временных световодов методом ионного осаждения. В качестве исследуемого оптического элемента был выбран фотонный кристалл (ФК) из оксида кремния, сформированный на кремниевой подложке с помощью осаждения ионным пучком диоксида кремния из газообразного прекурсора. Для измерения параметров запрещенной зоны ФК на кремниевой подложке методом ионного осаждения сформированы два планарных световода. В измеренных спектрах пропускания зарегистрирована полоса поглощения в диапазоне длин волн, которая соответствует параметрам, заданным при расчёте ФК. Таким образом, показана возможность проведения выборочных или контрольных измерений параметров элементов оптических микросхем, после их нанесения на подложку, подводя оптическое излучение через временные световоды, которые могут быть удалены после выполнения измерений. Результаты настоящей работы демонстрируют возможность использования временных оптических волноводов, сформированных методом ионного осаждения для контроля оптических параметров фотонных кристаллов и других элементов оптических микросхем.

PACS: 42.79-е. УДК: 53.082.534

Ключевые слова: спектры поглощения фотонных кристаллов, фотонные кристаллы, планарные световоды, ионное осаждение.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2640403](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2640403)

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время развитие оптических измерительных и передающих систем привело к созданию оптических планарных микросхем. Главная цель создания таких микросхем — миниатюризация оптических приборов и электроники вместе с достижением беспрецедентного быстродействия и энергоэффективности. Основными сферами применения оптических микросхем и приборов на их основе являются телекоммуникация и передача данных, квантовые вычисления и криптография, лазерные измерительные системы.

В оптических микросхемах, созданных по планарным технологиям для формирования оптических

потоков излучения, которые могут быть низкоинтенсивными, т.е. состоящими из отдельных фотонов, используют отражающие элементы с высоким коэффициентом отражения. При этом традиционные зеркала практически не применимы в оптических микросхемах, созданных по планарным технологиям. Поэтому в качестве отражающих элементов в оптических планарных микросхемах часто применяют брегговские зеркала, которые обычно являются частью волноводов. Если же в оптических планарных микросхемах применяются излучатели некогерентного или широкополосного излучения, не являющегося узконаправленным, то для формирования направленного пучка перспективным решением можно считать применение фотонных кристаллов.

Фотонным кристаллом (ФК) называется структура с периодическим изменением диэлектрической проницаемости. Такая структура имеет некоторые

* E-mail: vll@grainfood.ru

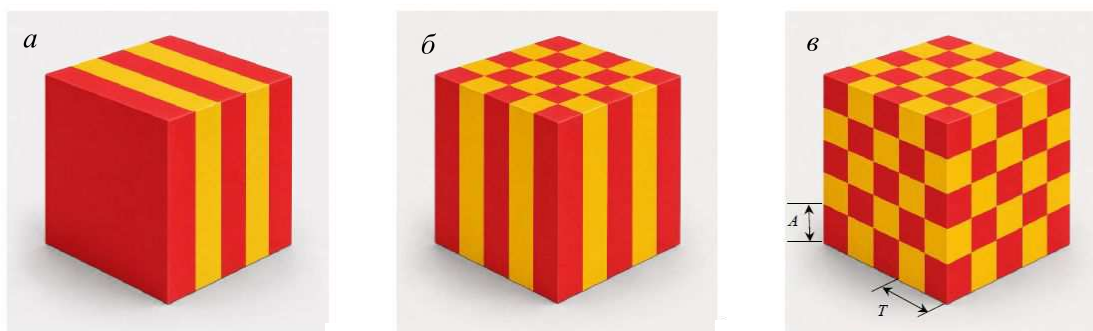


Рис. 1. Периодическое изменение показателя преломления в одном (а), двух (б) и трёх (в) пространственных направлениях. T — период структуры и A — размер элемента с показателем преломления ФК

свойства кристалла, одно из которых — особенность распространения излучения с различной энергией фотона. Показатель преломления ФК может периодически изменяться в одном (рис. 1, а), двух (рис. 1, б) или трёх пространственных направлениях (рис. 1, в) [1].

ФК можно использовать как структурные элементы для приборов световодной техники [2], лазерных систем, оптоэлектроники [3]. Например, на основе ФК можно реализовать: узкополосные фильтры, пропускающие или поглощающие определённую частоту излучения; коммутаторы и мультиплексоры, обеспечивающие пространственное разделение и маршрутизацию пучков с различными частотами; переходные элементы из волновода в волновод, обеспечивающие минимальные переходные помехи, для элементов интегральных микросхем (например, транзисторов); фотонно-кристаллические волокна; объёмные резонаторы лазеров.

Цель исследования — возможность применения измерения спектральных характеристик элементов оптических микросхем, выполненных по планарным технологиям, с использованием временных планарных световодов, сформированных методом ионного осаждения.

ФК могут быть сформированы голографическими методами внутри прозрачных сред, как брэгговские зеркала в световодах [4–7]. Но в последнее время активно используются методы создания ФК с помощью массивов плотно упакованных сфер [8, 9].

Эти методы в основном используются при формировании всех элементов оптической микросхемы одновременно. Последующая обработка или добавления деталей обычно не предусмотрена. Однако для формирования, например, источников низкоинтенсивного излучения на основе полупроводниковых одно- или нульмерных структур, таких как коллоидные квантовые точки [10] на подложке, сначала необходимо создать наноструктуры. Затем выделить одну или несколько наноструктур, которые используют в качестве излучающего элемента низкоинтенсивного источника. Это важное требование,

так как перемещение наноструктур представляется затруднительным, а формирование ФК одновременно с полупроводниковыми наноструктурами может быть невозможно. Поэтому невозможно использовать маски из фоторезиста, так как при их удалении будут удалены наноструктуры, не закрепленные на подложке. Поэтому, чтобы к сформированным планарным элементам добавить фотонный кристалл и измерить его спектральные параметры, автор предлагает разместить на подложке часть измерительной системы.

1. ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА МЕТОДОМ ИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ

ФК был сформирован на кремниевой подложке, для этого были использованы возможности растрового электронного микроскопа NVision 40 производства фирмы Carl Zeiss. В состав этого микроскопа входят электронная и ионная пушки, что позволяет не только получать изображение в отражённых электронах, но и модифицировать поверхность образца с помощью ионного пучка [11]. Ионный пучок представляет собой поток положительно заряженных тяжёлых ионов (в данной работе используется источник ионов галлия). Ионы за счёт своей массы при взаимодействии с поверхностью образца выбивают части материала, что приводит к изменению рельефа поверхности на микро- и наноразмерах, так как диаметр пучка составляет от единиц до десятков нанометров. Эту особенность используют для прецизионного травления поверхности. Кроме травления, с помощью пучка ионов можно проводить прецизионное осаждение материалов. Для этого в область, облучаемую ионным пучком, подаются металлоорганические соединения в газовой форме, в данном случае тетраэтоксисилан (TEOS). Вторичные электроны, которые получаются при взаимодействии ионов галлия с поверхностью образца, расщепляют углеводородные газы-предшественники. В результате этого процес-

са на поверхности локально происходит осаждение проводящих (W, Pt, C...) или диэлектрического (SiO_x) материалов [12].

Модифицирование поверхности в данном случае производилось с разрешением 7 нм. Данное ограничение обусловлено минимальным диаметром ионного пучка. При создании ФК и системы ввода/вывода излучения использовался прекурсор для осаждения диоксида кремния, в данном случае тетраэтоксисилан (TEOS). ФК напылялся при токе 150 пА, а световоды при токе 2.5 нА. Такие значения токов были подобраны экспериментальным путём для уменьшения времени осаждения. При увеличении времени осаждения на таких больших элементах иногда появлялся дрейф системы управления лучом, что приводило к искажению напыляемого элемента.

Исследование ФК с запрещённой зоной в видимом диапазоне было необходимо для использования подобных структур для создания оптических систем управляющих излучением одиночных коллоидных квантовых точек из селенида кадмия, спектр фотолюминесценции которых, в зависимости от размера, может находиться в пределах всего видимого диапазона. В качестве примера был задан диапазон длин волн от 530 до 560 нм для запрещённой зоны ФК.

2. МЕТОД РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Для определения геометрических параметров ФК, которые определяют его спектральные свойства, проведено моделирование зависимости запрещённой зоны и соответственно, спектра пропускания ФК от размера и периода слоёв с различным показателем преломления.

Существуют два основных подхода к моделированию спектральных свойств такого ФК [13]. Первый заключается в одномерном расчёте с помощью метода трансфер-матрицы и базируется на разбиении ФК на однородные слои. Показатель преломления каждого слоя определяется с помощью теории эффективной среды. Недостатком первого метода является невозможность строго учесть влияние инородных материалов на спектральные свойства структуры. Второй метод — прямое трёхмерное моделирование, например методом конечных разностей во временной (Finite-Difference Time-Domain (FDTD)) [14] или частотной (Finite-Difference Frequency-Domain (FDFD)) областях — позволяет учесть свойства всех материалов. Используемый метод FDFD основан на численном моделировании, при котором расчёт модовой структуры ФК выполнялся с помощью программного обеспечения MIT Photonic Bands (MPB).

Было применено моделирование по методу конечных разностей в частотном диапазоне с параметрами: период структуры 1.23 мкм, диаметр цилиндра 300 нм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.10$,

поляризация ТМ, нормальное падение. Из вычисленной модовой структуры были найдены спектры пропускания $T(\lambda)$ ограниченного ФК толщиной 8 мкм. Структуру ФК задавали с трёхмерным распределением показателя преломления в виде так называемой «поленницы» [15], показанной на рис. 1, в, где T — период структуры, A — размер элемента с постоянным показателем преломления.

С помощью данного метода было построено распределение пропускания ФК в зависимости от частоты и получены значения для стороны области с диоксидом кремния $A = 300$ нм и периода ФК $T = 1.23$ мкм. С этими параметрами и был выращен ФК ($B \times H \times L$).

Формирование ФК, как упоминалось выше, было выполнено с помощью растрового электронного микроскопа NVision 40. Для формирования ФК с помощью ионной пушки напылялся диоксид кремния на кремниевую подложку. При данном методе формирования молекулы диоксида кремния осаждаются на подложку только в местах, облучаемых ионным пучком. Таким образом, можно формировать структуру с заранее заданными геометрическими размерами.

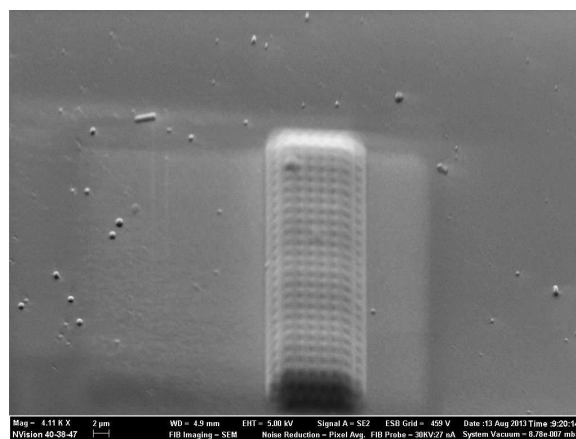


Рис. 2. Фотонный кристалл из SiO_2 на кремниевой подложке

Полученный ФК представлен на рис. 2. Внешние размеры ФК составляют $3 \times 20 \times 10$ мкм.

3. УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Основными параметрами ФК, которые важны для использования его для оптических применений, являются спектры пропускания и отражения. Для получения спектров пропускания необходимо измерить спектры излучений, падающих на ФК и прошедших через него. Непосредственно для измерений спектров падающего и прошедшего излучений использовали ближнепольный оптический микроскоп Witek alpha 300, который имеет в своем составе спектрометр, сопряженный с охлаждаемой CCD-камерой, что позволяет измерять спек-

тры фотолюминесценции и отражения с площадей размером от 0.5 до 5 мкм. Принципиальная оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

ФК, используемые в качестве элементов оптоэлектроники, размещаются на поверхности кремниевых подложек как наиболее часто используемом и доступном основании. Так как все элементы оптоэлектронной схемы обычно располагаются на одном основании, то нас интересуют свойства ФК вдоль подложки. Для измерений спектров пропускания, необходима возможность фокусировки освещающей и регистрирующей оптических систем на поверхности ФК.

Как указывалось выше, высота ФК составляла 3 мкм. Поэтому для удобства фокусировки на его поверхности фотонный кристалл размещался ближе к краю подложки.

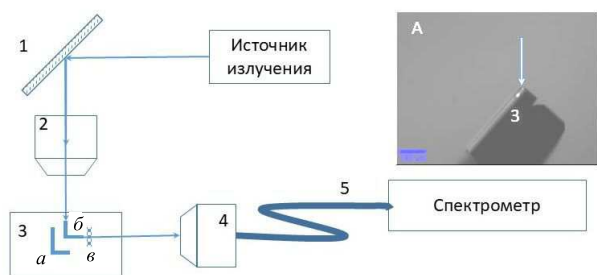


Рис. 3. Принципиальная схема проведения измерений спектров пропускания: 1 — оптическая система ввода излучения в микроскоп от источника широкополосного излучения, 2 — фокусирующая система микроскопа, 3 — подложка с нанесенными на неё световодами (a и б) и ФК (в), 4 — оптическая система микроскопа собирающая прошедшее излучения и передающая его на световод (5) для ввода в спектрометр

В ближнепольном оптическом микроскопе возбуждающее излучение подаётся по вертикальной оси (рис. 3), а регистрация сигнала происходит в направлении перпендикулярном возбуждающему излучению. На вставке рис. 3, a показан координатный столик с образцом 3 со стороны регистрирующей системы. Стрелкой показано направление возбуждающего излучения. Светлая точка на торцевой поверхности образца соответствует излучению, прошедшему через планарный световод.

Так как ФК 3в (рис. 3) может быть сформирован на подложке в произвольном месте и не всегда для измерения спектров пропускания на его поверхность можно сфокусировать излучение, то рядом с ФК на кремниевую подложку методом ионного осаждения напылены два планарных световода (рис. 4). Световоды выполнены изогнутыми на 90° для исключения попадания паразитной засветки от источника белого света, не прошедшего через световод на вход спектрального прибора. Чёрные прямоугольники на концах световода — следы от поперечного травления концов световода, которое проводилось с помощью ионного пучка. Такое

стравливание необходимо для формирования ровной поверхности для ввода и вывода излучения из световода, аналогичное скалывание проводится для стеклянных световодов для уменьшения потерь при вводе излучения в световод.

В рассматриваемом случае стравливание необходимо для формирования выходной границы, перпендикулярной направлению распространения излучения. Сформированные два планарных световода отмечены на рис. 3 как 3a и 3б. Один использовали в качестве опорного канала для измерения спектра широкополосного излучения, падающего на ФК, а второй планарный световод был сформирован таким образом, чтобы прошедшее через него излучение попадало на ФК и, проходя через ФК, направлялось на вход регистрирующей системы. С помощью ближнепольного оптического микроскопа измерены спектры пропускания световодов и ФК.

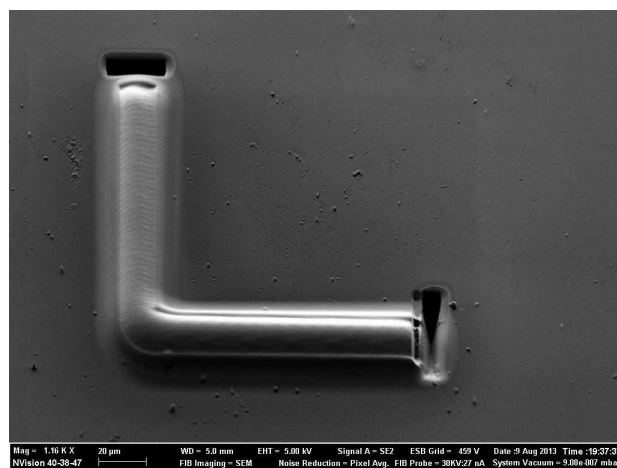


Рис. 4. Изображение планарного световода, полученное в растровом электронном микроскопе

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При измерении спектров пропускания нормировку сигналов между опорным и основным световодами проводили следующим образом. Для измерения спектров пропускания использовали широкополосное оптическое излучение от лампы, поэтому после выхода из световодов это излучение расходится под тем же телесным углом, под которым было в него введено. Для внесения корректив, связанной с возможными неоднородностями внутри световодов, измеряли интенсивность излучения, выходящего под одним и тем же углом в опорном и основном каналах. При этом излучение из основного канала не проходило через ФК. Такое допущение справедливо вследствие того, что возбуждающее излучение не когерентно и не образуются выделенные моды и спекл-картины.

Полученное соотношение сигналов опорного и основного каналов использовали для построения

спектра пропускания. На рис. 5 приведены спектры пропускания: рассчитанный методом FDFD (кривая 1) и измеренный при прохождении широкополосного оптического излучения через фотонный кристалл (кривая 2). Измеренный спектр пропускания имеет характерный минимум в области 545 нм.

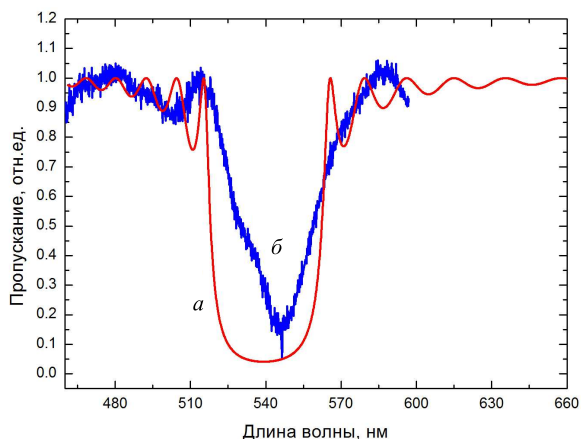


Рис. 5. Спектры пропускания фотонного кристалла: рассчитанный с помощью метода FDFD (а) и измеренный (б)

Так как диоксид кремния не поглощает оптическое излучение в диапазоне 520–580 нм, то уменьшение поглощения в указанном диапазоне обеспечивается отражением фотонно-кристаллической структурой.

После измерения спектров пропускания исполь-

зованные планарные световоды при необходимости можно стравить с помощью метода ионного травления. Для этого необходимо перевести микроскоп из режима осаждения в режим травления и отключить подачу прекурсоров с диоксидом кремния. Данная процедура не занимает много времени. При этом следов от травления входов и выходов световода также может не оставаться, так как при таком травлении нет необходимости подтравливать подложку. На месте световодов можно разместить другие оптические планарные элементы. Данная методика является несомненным преимуществом, так как появляется возможность контролировать параметры элементов оптических микросхем в процессе их разработки и изготовления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продemonстрирована возможность формирования методами ионного осаждения временных оптических планарных световодов для контроля параметров ФК. Параметры ФК, полученного методом ионного осаждения диоксида кремния на поверхность кремниевой подложки, соответствуют расчётным. Таким образом, подобные световоды, напылённые методом ионного осаждения, можно использовать для исследования спектральных характеристик элементов оптоэлектроники и фотоники, созданных планарными методами. При этом световод после проведения измерений можно стравить методом ионного прецизионного травления с помощью ионного пучка.

- [1] Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Second Edition. Princeton university press, 2008.
- [2] Tang G.-J., He X.-T., Shi F.-L. et al. // *Laser Photonics Rev.* **16**, 2100300 (2022).
- [3] Firouzjaei A.S., Afghahi S.S., Ebrahimi Valmoozi A.-A. // *Recent Advances and Trends in Photonic Crystal Technology*, 2 (2024).
- [4] Shen X.X. et al. // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **8**, 672 (2006).
- [5] Campbell M., Sharp D.N., Harrison M.T. et al. // *Nature* **404**, 53 (2000).
- [6] Feiertag G. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **71**, 1441 (1997).
- [7] Kondo T., Juodkazis S., Mizeikis V. et al. // *New J. Phys.* **8**, 250 (2006).
- [8] Дышин А.А., Бондаренко Г.В., Киселёв М.Г. // *Журнал неорганической химии* № 67. 431. (2022). (A.A. Dyshin, G.V. Bondarenko, M.G. Kiselev // *Russ. J. Inorg. Chem.* **67**. 408. (2022).)
- [9] Большаков Е.С., Щемелев И.С., Иванов А.В., Козлов А.А. // *Журнал аналитической химии* № 10. 875. (2022). (E.S. Bolshakov, I.S. Schemelev, A.V. Ivanov, A.A. Kozlov // *Journal of Analytical Chemistry* **77**, N 10. 1215. (2022).)
- [10] Булыгин Ф.В., Крутиков В.Н., Биленко И.А. и др. // *Измерительная техника* № 1. 30. (2013). (F.V. Bulygin, V.N. Krutikov, I.A. Bilenko et al. // *Measurement Techniques* **56**, N 1. 41. (2013).)
- [11] Giannuzzi L.A., Stevie F.A. Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. Springer, 2005.
- [12] Reyntjens S., Puers R. // *J. Micromech. Microeng.* **10**, 181 (2000).
- [13] Пятнов М.В., Бикбаев Р.Г., Ветров С.Я., Тимофеев И.В. // *Письма в ЖТФ* № 13. 20. (2024).
- [14] Lavrinenko A. et al. // *Opt. Express* **12**, 1623 (2004).
- [15] Самусев К.Б., Рыбин М.В., Самусев А.К., Лимонов М.Ф. // *Физика твердого тела* № 12. 2420. (2015). (K.B. Samusev, M.V. Rybin, A.K. Samusev, M.F. Limonov // *Physics of the Solid State* **57**, N 12. 2494. (2015).)

Formation of Planar Optical Fibers by Ion Deposition for Measuring the Transmission Spectra of Silicon Oxide Photonic Crystals

V. L. Lyaskovskii

Institute of Grain and Food Processing Industries

Moscow 115093, Russia

E-mail: vll@grainfood.ru

Quantum information systems, such as quantum computers and quantum cryptography systems, have undergone active development in recent years. In such systems, optical radiation pulses consisting of a small number of photons are used to perform computational and measurement tasks. To reduce the geometrical dimensions of measuring, computational, and communication optoelectronic devices, microchips created using planar technologies are employed. The optical elements of such microchips are created in a single production process and form a unified optical circuit, but during debugging or determination of the operating features of the microcircuit, it may be necessary to measure the optical parameters of individual elements of such microcircuits. The present work is devoted to the study of the process of measuring the spectral parameters of individual elements of optical microcircuits manufactured using planar technology. When measuring spectral parameters, it is proposed to deposit temporary optical fibers onto the microcircuit substrate by ion deposition. A silicon oxide photonic crystal (PC), formed on a silicon substrate by ion-beam deposition of silicon dioxide from a gaseous precursor, was selected as the optical element under investigation. To measure the parameters of the PC band gap, two planar optical waveguides were formed on a silicon substrate by ion deposition. In the measured transmission spectra, an absorption band was recorded in a wavelength range corresponding to the parameters specified in the PC calculation. Thus, the possibility of carrying out selective or control measurements of the parameters of optical microcircuit elements after their deposition on the substrate has been shown, with optical radiation fed through temporary optical fibers, which can be removed after the measurements have been performed. The results of the present work demonstrate the possibility of using temporary optical waveguides formed by ion deposition to control the optical parameters of photonic crystals and other elements of optical microcircuits.

PACS: 42.79-e.

Keywords: absorption spectra of photonic crystals, photonic crystals, planar light guides, ion deposition.

Received 23 June 2026.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. . Pp. .

Сведения об авторе

Лясковский Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, генеральный директор;

e-mail: vll@grainfood.ru.