

Метод контролируемого локального лазерного окисления фотонных кристаллов на основе пористого кремния

Л.Г. Кузнецов,¹ Н.И. Пышков,¹ С.Е. Свяховский^{1,*}

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

(Поступила в редакцию 28.04.2026; после доработки 09.06.2026; подписана в печать 17.06.2026)

Представлен метод контролируемого локального лазерного окисления фотонных кристаллов на основе пористого кремния. Экспериментально исследован процесс термического окисления фотонных кристаллов импульсным и непрерывным лазерным излучением. Исследована зависимость спектрального сдвига фотонной запрещённой зоны от мощности лазерного излучения и времени обработки. Продемонстрирована возможность локального окисления по заданному паттерну.

PACS: 42.70.Qs УДК: 535, 535.4

Ключевые слова: фотонные кристаллы, локальное лазерное окисление, пористый кремний.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.81.2640402

ВВЕДЕНИЕ

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой периодические структуры, обладающие фотонной запрещённой зоной (ФЗЗ) — диапазоном частот, в котором распространение света внутри кристалла невозможно, что позволяет эффективно управлять распространением электромагнитного излучения. Благодаря этому свойству ФК находят широкое применение в оптических фильтрах, сенсорах и устройствах интегральной фотоники [1]. Большое распространение получили ФК на основе пористого кремния благодаря возможности управления их оптическими свойствами в процессе формирования структуры. Использование пористого кремния в устройствах фотоники ограничивается большим поглощением в оптическом диапазоне [2]. Добиться уменьшения оптического поглощения можно, окислив пористый кремний до пористого кварца. Традиционно окисление осуществляется в печах при температуре 750–1100°C, этот метод приводит к окислению по всему объёму образца [3]. Было показано, что при более низких температурах энергии недостаточно для диффузии кислорода в глубину стенок пор [4].

Другим методом, позволяющим селективно изменять оптические свойства пористого кремния, является локальное лазерное окисление (ЛЛО) [5]. Процесс лазерного окисления в пористом кремнии зависит как от плотности энергии поглощаемого излучения, так и от пористости материала [6]. В работе [7] наблюдалось, что при окислении непрерывным лазером на длине волны 514.5 нм происходило уменьшение интенсивности наблюдаемых в инфра-

красных фурье-спектрах мод, соответствующих колебаниям растяжения Si — H_x и рост аморфной фазы Si — O₂. В работе [8] сообщалось о создании нанокompозита, представляющего собой нанокластеры кремния, включённые в матрицу диоксида кремния, сформированного отжигом пористого кремния импульсным лазером на длине волны 1064 нм в среде сильного окислителя без содержания паров воды. В ИК-спектрах пропускания полученного нанокompозита практически полностью отсутствовала полоса поглощения, соответствующая колебаниям Si — H_x-групп, и напротив, появился минимум пропускания на полосе, характерной для колебаний валентных мостиков Si — O — Si. Теми же авторами был предложен метод лазерно-индуцированного формирования силикатов эрбия и иттербия в объёме пористого кремния. Спектры фотолюминесценции показали, что ионы эрбия и иттербия находятся в активном оптическом состоянии, что позволяет формировать резонаторные интегрально-оптические структуры [9]. Лазерное окисление пористого кремния может быть использовано для создания микроструктур, таких как волоконные брэгговские решётки и волноводы, вытравливанием предварительно локально окисленных областей раствором плавиковой кислоты. Благодаря высокой удельной поверхности пористого кремния и зависимости оптических свойств от веществ, заполняющих поры, они находят применение в качестве газовых сенсоров [10, 11]. Также ранее было установлено, что воздействием лазерного излучения можно добиться локального окисления ФК [12]. Чтобы контролируемо окислять кристаллы методом ЛЛО и создавать ФК с различным спектром ФЗЗ в плоскости кристалла, необходимо исследовать зависимость процесса окисления от параметров излучения. В данной работе исследуется зависимость окисления от мощности лазерного излучения и времени окисле-

* E-mail: sse@shg.ru

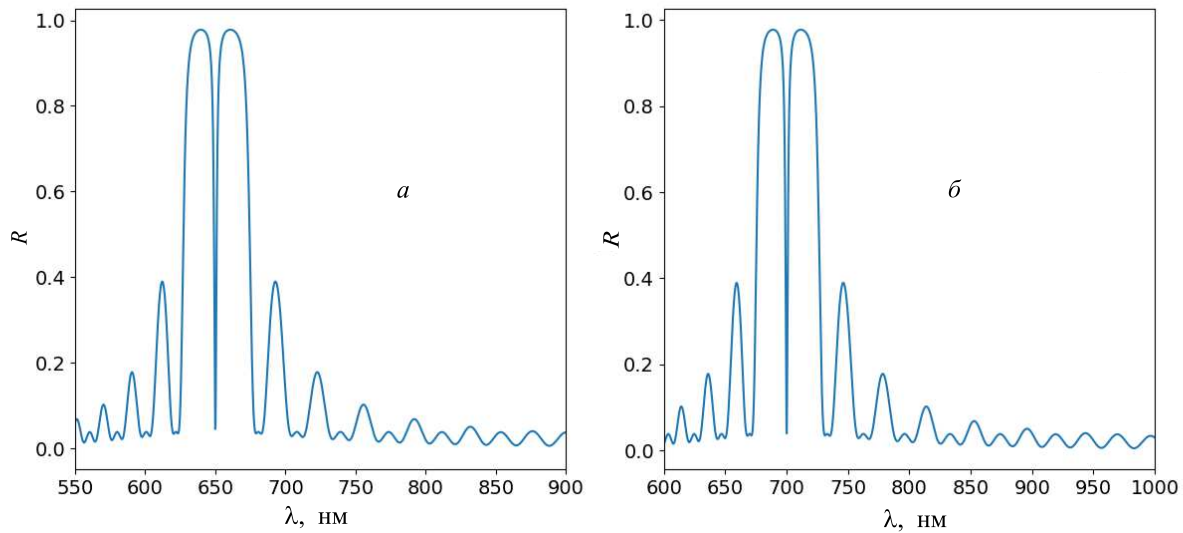


Рис. 1. Результат моделирования спектра отражения двух фотонных кристаллов: *a* — образец А, *б* — образец Б

ния и проверяется возможность окисления структур заданной геометрии. Предлагается метод локального лазерного окисления, позволяющий задавать спектральное положение фотонной запрещённой зоны ФК.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ

В целях исследования зависимости процесса окисления от параметров излучения были смоделированы образцы брэгговских микрорезонаторов из пористого кварца. Моделирование производилось с помощью широко известного рекурсивного метода матриц переноса [13]. Образцы моделировались так, чтобы спектральное положение микрорезонаторной моды составляло 650 нм для образца А и 700 нм для образца Б. Показатели преломления слоёв в ходе моделирования составили 1.14 и 1.22. Пористости соответственно составили $p_1 = 0.77$ и $p_2 = 0.64$. Полученные модельные спектры отражения двух образцов представлены на рис. 1. Толщины слоёв для образца А составили $d_1 = 142$ нм, $d_2 = 133$ нм и для образца Б — $d_1 = 153$ нм, $d_2 = 143$ нм. Суммарная толщина образца составляла 14 мкм для образца А и 15 мкм для образца Б.

Образцы моделировались таким образом, чтобы длина волны воздействующего лазерного излучения находилась вне фотонной запрещённой зоны образцов, где коэффициент отражения на воздействующих длинах волн достаточно мал. В противном случае, если длина волны лазера будет находиться в области ФЗЗ, можно ожидать, что излучение будет проникать лишь на небольшую глубину и окисление будет происходить значительно медленнее.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Далее по результатам моделирования были изготовлены серии образцов методом электрохимиче-

ского травления в растворе плавиковой кислоты и этанола, подробно описанном в [14]. Толщина микрорезонатора составляла 100 слоёв: двух брэгговских зеркал в 50 слоёв и активного слоя между ними, протравленных при модуляции плотности анодного тока. Образцы вытравливались на кремниевой подложке толщиной 500 мкм и в дальнейшем с неё не снимались. Удельное сопротивление пластин составляло 0.002 Ом·см, кристаллографическая ориентация поверхности (001). Плотности анодного тока составляли $j_1 = 40$ мА/см², $j_2 = 200$ мА/см². Оба исходных образца нарезались сфокусированным лазерным лучом на 19 частей, из которых впоследствии отбирались группы со сходным положением центра ФЗЗ. Это было сделано для минимизации влияния неоднородности исходного образца и предотвращения окисления соседних областей для различных процессов окисления.

3. ЛАЗЕРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ

Лазерное окисление проводилось отдельно в двух режимах: импульсном (образец А) и непрерывном (образец Б). Для импульсного режима использовался опто-волоконный лазер Raycus P20QB с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 120 нс. Луч лазера проходил через линзу с фокусным расстоянием 160 мм, образец находился на расстоянии 25 мм перед фокусом линзы. Радиус пучка в плоскости образца составлял 550 мкм. Пучок сканировал поверхность образца по окружности диаметром 1.5 мм с заданной частотой следования импульсов 80 кГц и скоростью сканирования луча 1000 мм/с, число проходов составляло 50000. В целях определения зависимости степени окисления от интенсивности поглощаемого излучения, мощность лазерного излучения варьировалась в пределах от 4 до 14 Вт. Положение фотонной запрещённой зоны ФК

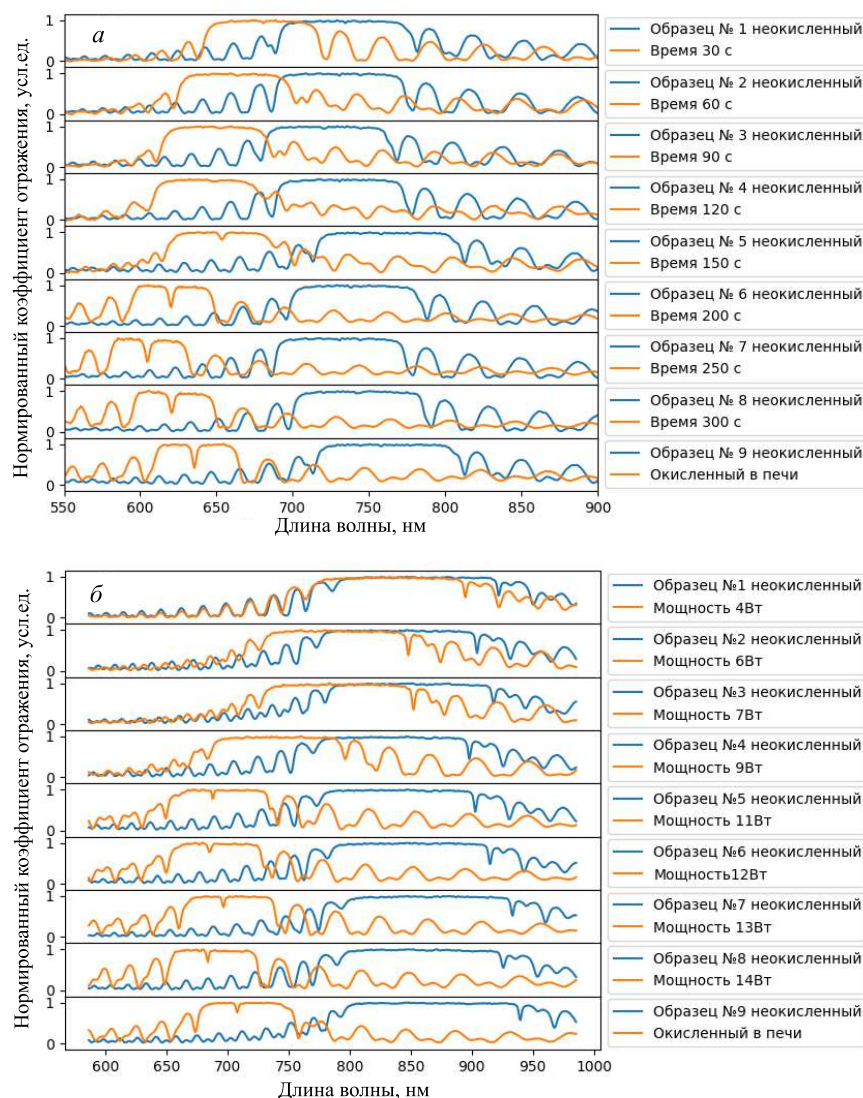


Рис. 2. Спектры отражения двух серий образцов брэгговских микрорезонаторов, окисляемых непрерывным лазерным излучением (а) и импульсным излучением (б). Варьирование происходит по времени окисления в первом случае и по мощности излучения во втором. Синяя кривая — спектр до обработки, жёлтая — после

зависит от показателей преломления слоёв, из которых он состоит. Поскольку при окислении кремния меняется показатель преломления слоёв, степень окисления пористого кремния в фотонном кристалле может быть оценена по сдвигу его фотонной запрещённой зоны [15].

Для непрерывного режима использовался диодный лазер с длиной волны 455 нм. Излучение проходило через линзу с фокусным расстоянием 16 мм и попадало на образец, расположенный за фокусом, формируя на образце квадратное пятно со стороной 2 мм. Форма пятна обусловлена геометрией лазерного диода. В данном случае варьировалось время засветки в пределах от 30 до 150 с. Мощность излучения составляла 3 Вт. При лазерном облучении образец располагался на керамической подставке в целях минимизации тепловых потерь. Окисление по заданному паттерну также проводилось при помощи непрерывного излучения диодного лазера,

сфокусированного линзой с фокусным расстоянием 16 мм. Керамическая подставка с образцом располагалась на подвижной платформе, способной перемещаться в горизонтальной плоскости с шагом 20 мкм. Окисление проводилось на воздухе.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментального исследования процесса окисления были измерены спектры коэффициента отражения окисленных образцов. Измерения проводились при помощи пучка белого света, сфокусированного в область диаметром 0.1 мм. Спектр измерялся при нормальном падении с помощью спектрометра OceanInsight QEPro. В качестве исходных образцов брались неокисленные образцы с центром ФЗЗ, расположенным в конечном диа-

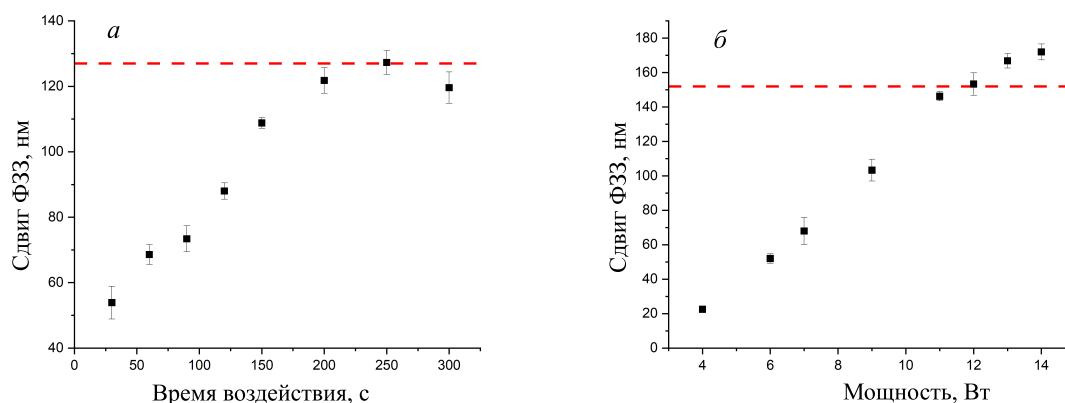


Рис. 3. Зависимости сдвига спектрального положения фотонной запрещённой зоны от времени воздействия излучением непрерывного лазера (а) и от мощности излучения импульсного лазера (б). Пунктирной линией обозначен уровень полного окисления, полученный при выдержании образцов в печи при температуре 800°С на протяжении 12 ч

пазоне длин волн, что являлось следствием неоднородности исходного образца. Для образца А спектральное положение неокисленного образца составило 720–760 нм, а для образца Б — 835–860 нм. При дальнейшем построении графиков рассматривался спектральный сдвиг центра ФЗЗ относительно неокисленного состояния каждого образца соответственно.

По результатам серии окислений было установлено, что сдвиг центра ФЗЗ обусловлен окислением пористого кремния до пористого кварца. На рис. 2 показаны спектры отражения для двух серий образцов с варьированием времени окисления при постоянной мощности непрерывного излучения в первом случае и мощности импульсного лазерного излучения при постоянном времени во втором. В обоих случаях на спектрах неокисленных образцов отсутствует брэгговская микрорезонаторная мода, что связано с поглощением излучения в первых 50 слоях, не позволяющим свету достичь этой моды. Можно заметить, что на спектрах окисленных образцов эта мода проявляется по мере окисления, что говорит о глубоком окислении образца. Спектральная ширина ФЗЗ уменьшается по мере окисления, что свидетельствует об уменьшении контраста показателей преломления слоёв, вызванным окислением.

На рис. 3 представлены графики зависимостей положения ФЗЗ от мощности воздействующего импульсного лазерного излучения и времени засветки непрерывным лазерным излучением соответственно. Как можно видеть, обе зависимости в исследуемых пределах носят монотонный характер, близкий к линейному, что говорит о возможности контролировать положение ФЗЗ и, соответственно, степень окисления ФК. При мощности около 14 Вт график зависимости сдвига спектрального положения центра ФЗЗ от мощности начинает выходить на насыщение, что связано с приближением к полностью окисленному состоянию. При дальнейшем увеличении мощности излучения начиналось заметное

разрушение поверхности образца. При изменении времени окисления на непрерывном лазере спектральный сдвиг центра ФЗЗ достигал максимального значения при окислении в течение 150 с, дальнейшее увеличение времени окисления не приводило к большему сдвигу. Также были измерены спектры отражения контрольных образцов, окислявшихся в печи при температуре 800°С на протяжении 12 ч. Спектральные положения центров ФЗЗ контрольных образцов после термического окисления составили 635 нм (образец А) и 714 нм (образец Б). Как видно, максимальный сдвиг спектрального положения центра ФЗЗ образцов, окисленных импульсным излучением, оказался больше, чем у контрольного образца. Это, вероятно, вызвано тем, что окисление сопровождалось отжигом части кремния в порах и увеличением пористости слоёв. Также видно, что сдвиг центра ФЗЗ для времени окисления 300 с оказался меньше, чем для времени 250 с. Это, по-видимому, является следствием неоднородности исходного образца и частичным окислением образца в условиях окружающей среды.

В целях наглядности и оценки разрешающей способности двумерной лазерной записи образец ФК был локально окислен непрерывным излучением по заданному паттерну. Форма паттерна выбрана из соображения наличия на ней большого количества однотипных мелких деталей переменной плотности — пикселей, что позволяет судить о разрешимости отдельных близкорасположенных окисленных областей с задёлом на цифровую запись информации на поверхности ФК с последующим считыванием. На рис. 4 представлена спектральная карта образца. Чтобы её снять, область считывания была разбита на сетку с шагом 20 мкм, и в каждой точке сетки был измерен спектр отражения. Для повышения контрастности полученного изображения был применён метод постобработки спектральной карты, при котором в каждой точке рассчитывалась спектральная сумма интенсивности в диа-

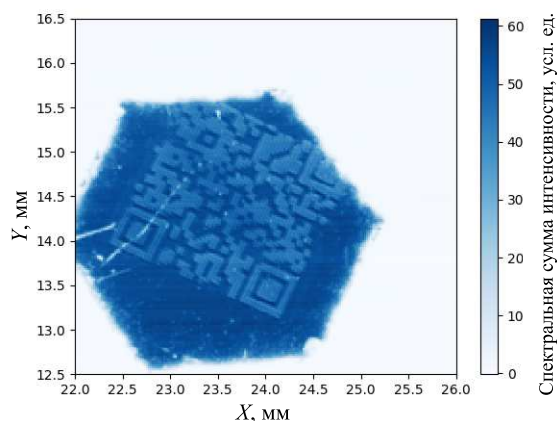


Рис. 4. Спектральная карта окисленного фотонного кристалла

пазоне длин волн 687–737 нм, что соответствовало диапазону длин волн вблизи микрорезонантной моды полностью окисленного образца. Это было сделано для избавления от вклада осцилляций по краям. Характерный размер окисленных областей (пикселей), полученный при измерении спектральной карты составил порядка или меньше 100 мкм, но, поскольку диаметр сфокусированного пучка белого света, использовавшегося для измерения спектров отражения, составлял 100 мкм, кажется разумным принять это значение как верхнюю оценку

пространственного разрешения такой записи. Также заметно, что области с высокой плотностью пикселей претерпевают небольшое расплывание. Это, вероятно, связано с большим влиянием нагрева соседних областей и может быть решено увеличением временного интервала между засветками.

Ограничением метода может являться то, что при локальном окислении из-за неравномерного нарастания оксида по объёму образца происходит локальное расширение пластины, что приводит к механическим напряжениям внутри образца, чего не наблюдается при термическом окислении в печи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод локального лазерного окисления фотонных кристаллов на основе пористого кремния, позволяющий регулировать положение спектра фотонной запрещённой зоны в зависимости от параметров лазерного излучения. Продемонстрирована возможность локального окисления по заданному паттерну и оценена разрешающая способность такой записи.

Исследование зависимости спектрального сдвига фотонной запрещённой зоны от параметров лазерного излучения выполнено при поддержке гранта РФФИ № 21-72-10103 (завершен), выполнение измерений спектральных карт выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-72-10008.

- [1] Lv X., Zhong B., Huang Y. et al. // *Chin. J. Mech. Eng.* **36**, 39 (2023).
- [2] Leonardi A.A., Faro M.J.L., Irrera A. // *Anal. Chim. Acta.* **1160**, 338393 (2021).
- [3] Lin C.H. // In: Li, D. (eds). *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. Springer, Boston, MA, 2008.
- [4] Sierra-Moreno R.F., Lujan-Cabrera I.A., Cabrera-Teran J.M. et al. // *J. Mater. Sci.* **57**, 11226 (2022).
- [5] Rossi A.M., Amato G., Camarchia V. et al. // *Phys. Lett.* **78**, 3003 (2001).
- [6] De Stefano L. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter.* **20**, 265009 (2008).
- [7] Rocchia M., Rossi A., Borini S. et al. // *Physica Status Solidi (a)*. **202**, 1658 (2005).
- [8] Григорьев Л.В., Михайлов А.В. // *Оптический журнал*. **80**, 11. 94 (2013).
- [9] Григорьев Л.В., Соломин С.О., Поляков Д.С. и др. // *Оптический журнал*. **83**, № 7. 51 (2016).
- [10] Kim K., Murphy T.E. // *Optics express*. **21**, 17 19488 (2013).
- [11] Rea I., Iodice M., Coppola G. et al. // *Sensors and Actuators B-chemical*. **139**, 1. 39 (2009).
- [12] Кузнецов Л.Г., Пышков Н.И., Свяховский С.Е. // *Письма в ЖТФ*. **49**, № 16. 25 (2023).
- [13] Balili R.B. // *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. **17**, 159 (2012).
- [14] Svyakhovskiy S.E., Maydykovsky A.I., Murzina T.V. // *J. Appl. Phys.* **112**, 1. 013106 (2012).
- [15] Lujan-Cabrera I.A., Anaya Rivera E.K., Rizzo Sierra J.A. et al. // *Photonics*. **12**, N 2. 94 (2025).

Method of Controlled Local Laser Oxidation of Porous-Silicon Photonic Crystals

L.G. Kuznetsov, N.I. Pyshkov, S.E. Svyakhovskiy^a

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

A method of controlled local laser oxidation of porous-silicon-based photonic crystals is presented. The thermal oxidation of photonic crystals by pulsed and continuous-wave laser radiation is studied experimentally.

The dependence of the spectral shift of the photonic band gap on the laser power and processing time is investigated. The possibility of local oxidation according to a predefined pattern is demonstrated.

PACS: 42.70.Qs

Keywords: photonic crystals, local laser oxidation, porous silicon.

Received 28 April 2026.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2026. **81**, No. 4. Pp. .

Сведения об авторах

1. Кузнецов Лев Георгиевич — инженер первой категории; e-mail: levandovsky97@mail.ru.
2. Пышков Николай Иванович — мл. науч. сотрудник; e-mail: pyshkovni@my.msu.ru.
3. Свяховский Сергей Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: sse@shg.ru.