

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.015: 538.958

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2026.2.357-371>

Исследование оптических спектров пропускания тонких пленок палладия различной морфологии и структуры в условиях воздействия водорода

И.В. Янилкин¹ ✉, А.В. Петров¹, А.И. Гумаров¹, А.М. Рогов¹,
Б.Р. Буляков^{1;2}, Р.В. Юсупов¹, Л.Р. Тагиров^{2;3}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

²Институт прикладных исследований, Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия

³Казанский физико-технический институт ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия

✉ yanilkin-igor@yandex.ru

Аннотация

В работе представлены результаты синтеза и исследований пленок палладия, предназначенных для работы в сенсорах водорода. Тонкие пленки палладия номинальной толщины 10 нм и различной морфологии и структуры были выращены методом молекулярно-пучкового осаждения: на подложке MgO(001) – гладкая эпитаксиальная пленка, на подложке Al₂O₃(0001) – гранулярная поликристаллическая и островковая пленки. Кристаллическая структура пленок исследовалась *in situ* с помощью дифракции медленных электронов. Морфология поверхности пленок была получена *ex situ* с применением атомно-силовой микроскопии. Выяснилось кардинальное отличие реакции оптического поглощения на нагружение водородом сплошных и островковой пленок в интервале длин волн 300–2500 нм: спектрально почти однородная для сплошных и знакопеременная для островковых пленок. Модуль максимального относительного изменения оптического пропускания лежит в интервале 9–16%, что делает тонкие пленки палладия различных морфологий перспективными для конструирования оптоэлектронных сенсоров водорода.

Ключевые слова: пленки палладия, монокристаллическая пленка, поликристаллическая пленка, островковая пленка, оптический коэффициент пропускания, влияние водорода на оптические свойства

Благодарности. Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта № 35 на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Для цитирования: Янилкин И.В., Петров А.В., Гумаров А.И., Рогов А.М., Буляков Б.Р., Юсупов Р.В., Тагиров Л.Р. Исследование оптических спектров пропускания тонких пленок палладия различной морфологии и структуры в условиях воздействия водорода // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2026. Т. 168, кн. 2. С. 357–371.
<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2026.2.357-371>.

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2026.2.357-371>

Optical transmission spectra of palladium thin films with different morphologies and structures under hydrogen exposure

I.V. Yanilkin¹ ✉, A.V. Petrov¹, A.I. Gumarov¹, A.M. Rogov¹,
B.R. Bulyakov^{1;2}, R.V. Yusupov¹, L.R. Tagirov^{2;3}

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Russia

³Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

✉ yanilkin-igor@yandex.ru

Abstract

This article reports the synthesis and characterization of 10 nm thick palladium thin films intended for use in hydrogen sensors. The films, with various morphologies and structures, were grown using molecular beam deposition: smooth epitaxial film on MgO(001) substrate, granular polycrystalline and island films on Al₂O₃(0001) substrate. The crystalline structure was analyzed *in situ* by low-energy electron diffraction. The surface morphology was investigated *ex situ* via atomic force microscopy. The optical absorption response to hydrogen uptake differed significantly between continuous and island films in the 300–2500 nm range: it was almost spectrally uniform for the former and alternating in sign for the latter. The maximum relative change in optical transmittance modulus was in the range of 9–16 %, which makes the studied films promising for the design of optoelectronic hydrogen sensors.

Keywords: palladium films, single-crystalline film, polycrystalline film, island film, optical transmittance coefficient, effect of hydrogen on optical properties

Acknowledgments. This study was supported by the Science and Technology Foundation of the Republic of Tatarstan under project no. 35 (2025) for fundamental and applied research carried out at scientific and educational organizations, enterprises, and real-economy companies of the Republic of Tatarstan.

For citation: Yanilkin I.V., Petrov A.V., Gumarov A.I., Rogov A.M., Bulyakov B.R., Yusupov R.V., Tagirov L.R. Optical transmission spectra of palladium thin films with different morphologies and structures under hydrogen exposure. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2026, vol. 168, no. 2, pp. 357–371.

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2026.2.357-371>. (In Russian)

Введение

В последнее десятилетие, в связи с проблемой глобального потепления климата, значительное внимание научной общественности обращено к поискам малоуглеродных или безуглеродных источников энергии. Среди них важнейшее место занимает водород (см., например, монографии [1, 2]). Поскольку водород – горючий и взрывоопасный газ, на всех этапах работы с ним необходимо контролировать возможные утечки для предотвращения техногенных катастроф. Это делает крайне актуальным поиск путей и реализацию сенсоров водорода на эффективной, быстродействующей и энергосберегающей физике, взрывобезопасной в потоке водородсодержащего газа.

Сенсоры водорода известны, производятся серийно и коммерчески доступны. Они строятся на различных химических и физических принципах, таких как катализ, электрохимия, теплопроводность, изменение электрического сопротивления, изменение работы выхода, механический отклик, волоконная оптика, акустика (см., например, [3–7] и ссылки в них). В большинстве из них для детектирования присутствия водорода в анализируемой газовой смеси используется палладий (см. монографии и обзоры [8–11] в дополнение к приведенным выше источникам).

Палладий является одним из наиболее подходящих материалов для детектирования водорода ввиду его исключительно высокой чувствительности и селективности к водороду [3, 9, 10, 12]. При этом относительно высокая цена палладия нивелируется чрезвычайно малым его количеством в сенсорах водорода, которые используют палладий в виде тонких пленок или наночастиц/наноструктур [13]. Для получения быстрого отклика с большой амплитудой сигнала необходимо приблизить длину диффузии ионов водорода в палладии к характерным размерам сенсорной палладиевой (нано)структуры и увеличивать площадь поверхности [14]. Следовательно, важнейшим свойством пленочного сенсора является толщина пленки и морфология ее поверхности. Кроме того, на указанные свойства водородного сенсора также могут критически влиять кристаллическая структура пленки, наличие в ней дефектов, пор и примесей. Влияние морфологии и структуры пленки показано, например, в работах [15–19], где исследовались сплошные, островковые, нанокристаллические, поликристаллические, пористые и др. пленки.

В практике детектирования водорода одним из популярных решений является оптический метод [7, 20, 21], работающий на разных эффектах, но во всех вариантах использующий палладий в качестве чувствительного элемента. Изменение коэффициента пропускания электромагнитного излучения при нагружении водородом тонкой пленки палладия – наиболее простое явление, которое может быть легко измерено в оптической паре светодиод-фотодиод [22]. Данному типу сенсора посвящено достаточно много работ, однако во всех работах использовались поликристаллические сплошные [23–25] либо островковые пленки [26, 27]. Влияние водорода на коэффициент пропускания монокристаллической

пленки палладия практически не изучалось. При этом монокристаллические пленки демонстрируют наилучшую адгезию во всем диапазоне концентраций водорода в гидриде палладия [28–30], т. е. имеют большой ресурс работы и являются одним из потенциальных вариантов высококачественного оптического датчика водорода. Целью данного исследования является экспериментальное сравнение влияния водородного нагружения на коэффициент пропускания монокристаллической, поликристаллической и островковой пленок палладия.

1. Материалы и методы

1.1. Приготовление тонких пленок палладия. Палладий (чистотой 99.97 ат. %, Приокский завод цветных металлов, Россия) напылялся из предварительно калиброванной высокотемпературной эффузионной ячейки (CreaTec Fischer & Co GmbH, Germany) на монокристаллические подложки MgO (100) (Crystal GmbH, Germany) и Al₂O₃ (0001) (АО «Монокристалл», г. Ставрополь) в высоком вакууме не хуже 10⁻⁹ мбар (высоковакуумная система от SPECS Surface Nano Analysis GmbH, Germany). Оба вида подложек имеют паспортную шероховатость обеих сторон менее 0.5 нм, толщину 0.5 мм. Перед напылением подложки отжигались в высоком вакууме при температуре 800 °С в течение пяти минут для удаления поверхностных загрязнений.

Монокристаллические эпитаксиальные пленки палладия получались на подложке оксида магния с использованием трехэтапной методики, изложенной в работах [31, 32]. Первоначально напылялся слой номинальной толщины 4 нм при температуре подложки 400 °С. На втором этапе напылялись оставшиеся 6 нм палладия при комнатной температуре подложки. На третьем этапе проводился высоковакуумный отжиг при температуре 600 °С в течение одного часа. Скорость напыления составляла 10 нм/ч. Данная методика позволяет напылять на MgO(001) монокристаллические эпитаксиальные пленки Pd с малой шероховатостью и относительно малым числом дефектов.

Поликристаллические сплошная и островковая пленки напылялись на подложку оксида алюминия с той же скоростью. Для получения сплошной пленки, палладий напылялся на подложку, имеющую комнатную температуру; для получения островковой пленки температура подложки поднималась до 800 °С. Номинальная толщина всех пленок была 10 нм.

1.2. Методы характеристики структуры, морфологии и оптических свойств полученных пленок. Для структурного анализа пленок использовалось встроенное в молекулярно-лучевую вакуумную камеру оборудование для дифракции медленных электронов (ДМЭ) с поверхности подложек и пленок. Элементный анализ пленки проводился также *in situ* методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) в аналитической камере SPECS с магниевым рентгеновским источником и анализатором энергии электронов Phoibos150. Анализ морфологии поверхности выполнялся на атомно-силовом микроскопе Bruker FastScan.

Измерение коэффициента пропускания пленок палладия с/без водорода проводилось на эллипсометре Woollam VASE (J.A. WOOLLAM Co., USA) в диапазоне длин волн 0.3–2.5 мкм в специальной проточной газовой ячейке Linkam THMS600 (Linkam Scientific Instruments Ltd, UK). Поглощение ячейки и подложек учитывалось. Водород подавался в ячейку в смеси с азотом (4 об. % H₂ в N₂). Для высвобождения водорода ячейка продувалась чистым аргоном. Продувка обоих газов проводилась при нормальном давлении. Все измерения проводились при температуре 25 °С.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Результаты исследований структуры и морфологии полученных пленок палладия. Перед осаждением пленок поверхность подложек анализировалась с помощью дифракции медленных электронов. Все подложки проявили резкие дифракционные картины (см. рис. 1 (а), (б)), что указывает на высокую чистоту поверхности. После напыления все пленки палладия анализировались *in situ* методом дифракции медленных электронов. Пленка, выращенная на MgO(001), проявила дифракционную картину, соответствующую кубической системе (рис. 1 (в)), и когерентную для подложки и пленки (рис. 1 (б), (в)). Данный факт указывает на монокристаллический эпитаксиальный рост пленки палладия в моде «куб-на-кубе». Поликристаллическая и островковая пленки не имели дифракционных пиков. Элементный анализ, проведенный *in situ* методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, показал, что все пленки состоят из чистого палладия, никаких других элементов обнаружено не было на уровне 0.1 ат. % (рис. 1 (г)).

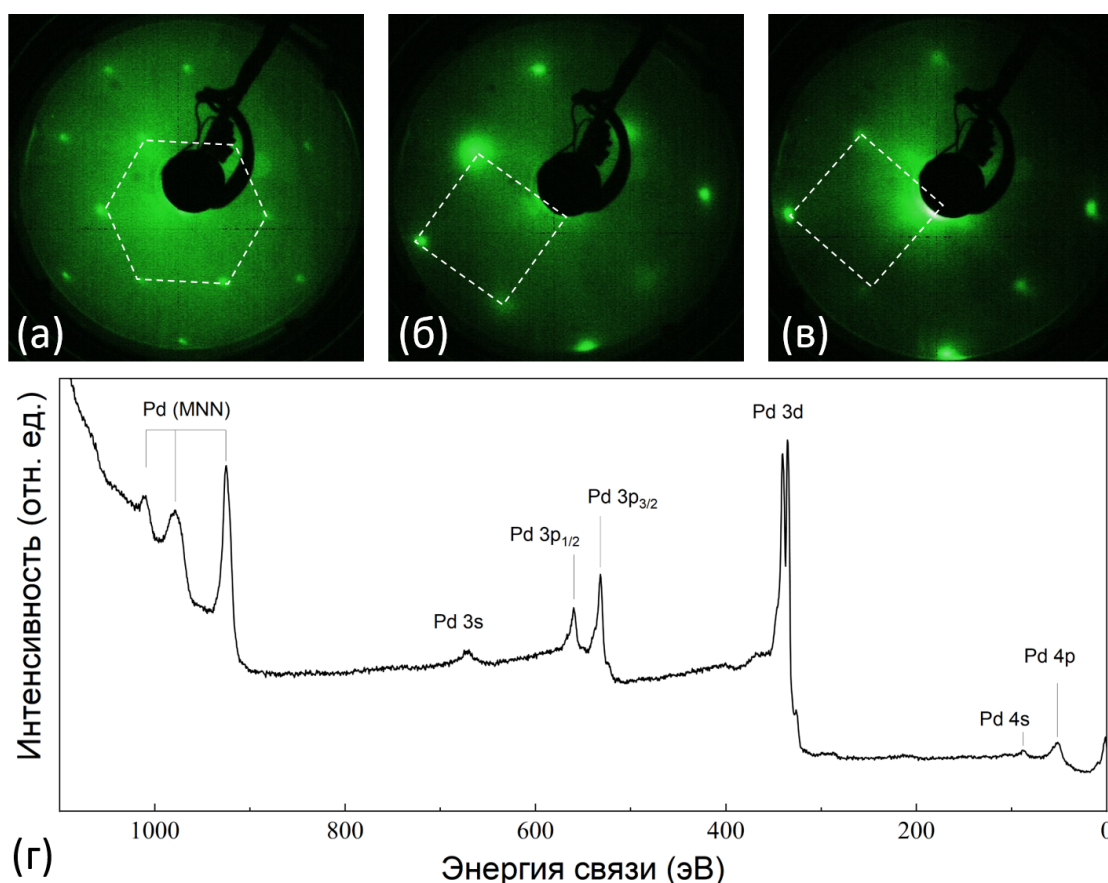


Рис. 1. Картина дифракции медленных электронов с поверхности подложек Al_2O_3 (а), MgO (б) и монокристаллической пленки (в); репрезентативный спектр рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии поликристаллической пленки палладия (г), идентичный таковому для остальных двух пленок

Fig. 1. Low-energy electron diffraction from the surface of Al_2O_3 (a), MgO (b), and single-crystalline palladium film (c); representative X-ray photoelectron spectroscopy spectrum of the polycrystalline palladium film (d), which is identical to that for the other two films

Исследование поверхности пленок методом атомно-силовой микроскопии показало существенные различия в морфологии образцов. Монокристаллическая пленка имеет гладкую поверхность с малой шероховатостью, поликристаллическая пленка имеет зернистую поверхность со средним размером зерна около 100 нм, островковая пленка состоит из островков палладия со средним размером около 150 нм (см. рис. 2).

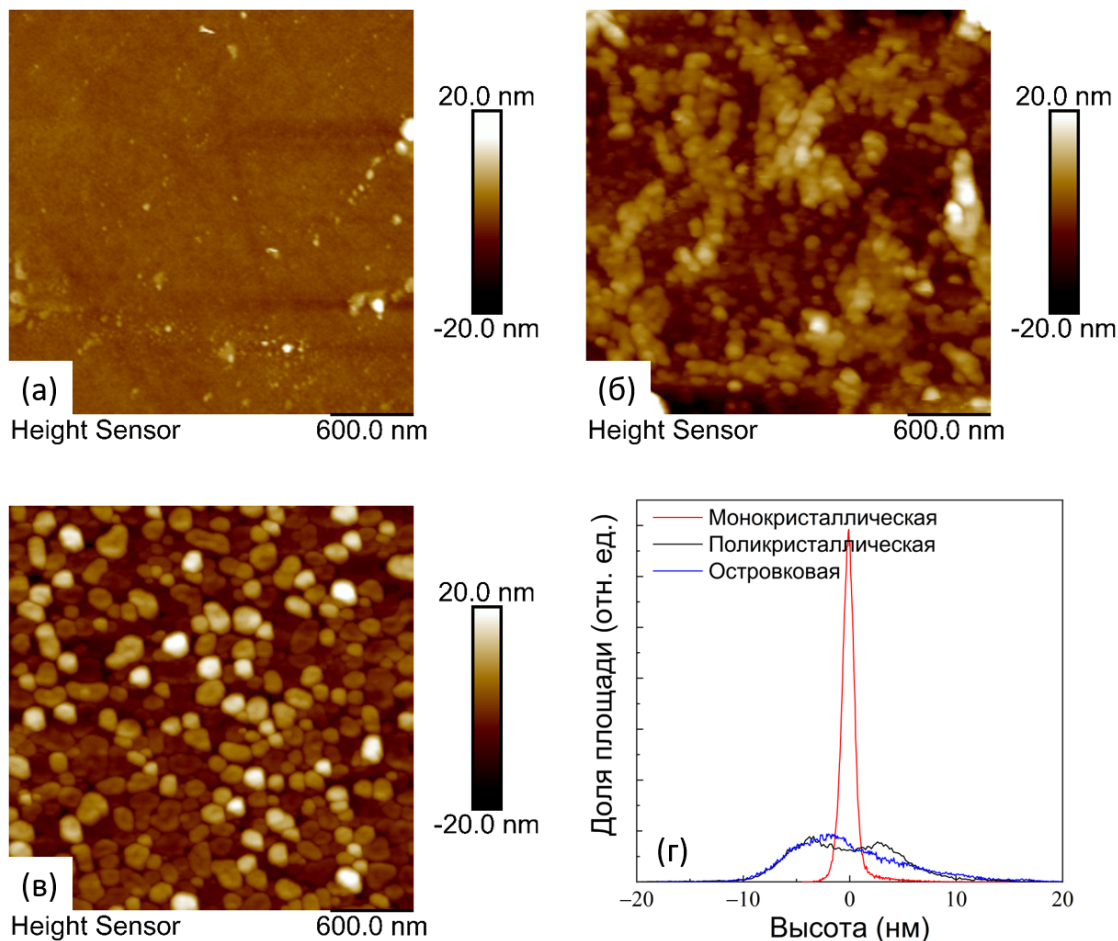


Рис. 2. АСМ-изображение монокристаллической (а), поликристаллической (б) и островковой (в) пленок и рассчитанное распределение высот поверхности пленок (г)

Fig. 2. AFM images of single-crystalline (a), polycrystalline (b), and island (c) films and the calculated distribution of film surface heights (d)

2.2. Влияние нагружения водородом на оптические свойства тонких пленок палладия различной структуры и морфологии. Измерение спектров оптического пропускания показало также существенное отличие между тремя пленками палладия (см. рис. 3 (а)). Коэффициент пропускания T поликристаллической пленки монотонно уменьшается с увеличением длины волны. Такое поведение является типичным для поликристаллических пленок и наблюдается, например, в работе [23]. Спектральная зависимость коэффициента пропускания монокристаллической пленки имеет схожий характер, однако сама величина T в два раза меньше (рис. 3 (а)). Как видно, оптические свойства

островковой пленки существенно отличаются от таковых для сплошных пленок – коэффициент пропускания сначала понижается при увеличении длины волны, затем выше 550 нм начинает увеличиваться. Такое немонотонное поведение, по-видимому, связано с возможным локальным поверхностным плазмонным резонансом, возникающим в наноструктурах палладия. Отметим, что явление локального поверхностного плазмонного резонанса на наночастицах палладия хорошо изучено и успешно используются для сенсоров водорода [20].

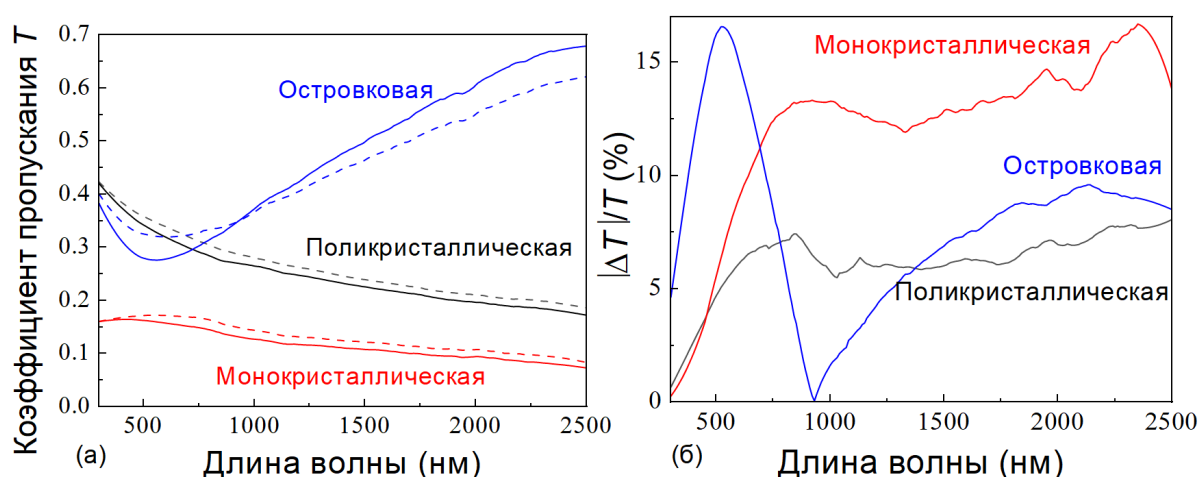


Рис. 3. Зависимость коэффициента оптического пропускания T в атмосфере без водорода (T_0 – сплошная) и с водородом (T – штриховая) (а), а также модуля его относительного изменения $|\Delta T|/T_0$ (б) от длины волны света для монокристаллической, поликристаллической и островковой пленок палладия

Fig. 3. Dependence of the optical transmittance coefficient T in an atmosphere without hydrogen (T_0 – solid line) and with hydrogen (T – dashed line) (a) and the modulus of its relative change $|\Delta T|/T_0$ (b) on the wavelength of light for single-crystalline, polycrystalline, and island palladium films

При взаимодействии с четырехпроцентной смесью водорода в азоте коэффициент пропускания монокристаллической и поликристаллической пленок увеличивается практически во всем диапазоне длин волн измерений. Увеличение прозрачности связано с изменением оптических свойств пленок из-за перехода палладия при поглощении водорода в смешанную $\alpha + \beta$ -фазу бинарной системы Pd-H [22, 23]. Величина эффекта $\Delta T/T_0 = (T - T_0)/T_0$ на монокристаллической сплошной пленке больше (рис. 3 (б)), чем на поликристаллической, что, вероятнее всего, связано с большей долей β -фазы при данной температуре (25 °C). Для проверки данного предположения были произведены оптические измерения при различных температурах, подтверждающие данный тезис. Результаты будут опубликованы позже.

Влияние водорода на островковую пленку палладия оказалось нетривиальным. В видимом диапазоне коэффициент пропускания увеличился, а в инфракрасном диапазоне уменьшился. Данный эффект, по-видимому, также связан с изменением параметров локального поверхностного плазмонного резонанса при образовании $\alpha + \beta$ -фазы гидрида палладия. Максимальная величина эффекта $\Delta T/T_0$ на длине волны 500 нм сравнима с монокристаллической пленкой.

Заключение

Синтезированы тонкие пленки палладия одинаковой номинальной толщины 10 нм, но разной морфологии и структуры: гладкая монокристаллическая, зернистая поликристаллическая и островковая пленки. Кристаллическая структура полученных пленок установлена с применением дифракции медленных электронов, морфология поверхности пленок была визуализирована с применением атомно-силовой микроскопии, а оптические свойства были промерены на спектроскопическом эллипсометре в диапазоне длин волн 300–2500 нм. Выполнены исследования влияния водорода на эволюцию спектров оптического пропускания синтезированных пленок. Установлено, что при нагружении 4 об.% водорода в азоте при температуре 25 °С коэффициент пропускания монокристаллической и поликристаллической сплошных пленок увеличивается практически во всем диапазоне длин волн измерений при монотонном уменьшении абсолютного оптического пропускания с ростом длины волны. Островковая пленка показала немонотонное знакопеременное относительное изменение оптического пропускания в диапазоне длин волн 300–2500 нм при значительном увеличении абсолютного пропускания с ростом длины волны в диапазоне 550–2500 нм: в видимом диапазоне оптическое пропускание увеличивалось, а в ИК-диапазоне – уменьшалось. Данный эффект, по-видимому, связан с локальным поверхностным плазмонным резонансом.

Данная работа показала, что монокристаллическая и островковая пленки палладия проявляют при комнатной температуре высокую оптическую чувствительность $\Delta T/T$ к четырехпроцентному содержанию водорода в азоте, так что максимальное относительное изменение оптического пропускания лежит в интервале 9–16% по модулю. Это делает тонкие пленки палладия монокристаллической и островковой структуры перспективными для конструирования оптоэлектронных сенсоров водорода.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Яруллин Р.С., Угрюмов О.В., Васюков С.И., Ткачева В.Э. Водород – топливо будущего: аналитический обзор. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 544 с. URL: <https://dspace.kpfu.ru/xmlui/viewer?file=163354;vodород-toplivo-buduschego.pdf>.
2. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. М.: Сколково, 2019. 62 с. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15540.91524>.
3. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. Hydrogen sensors – a review // Sens. Actuators, B. 2011. V. 157, No 2. P. 329–352. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.04.070>.
4. Luo Y., Zhang C., Zheng B., Geng X., Debliquy M. Hydrogen sensors based on noble metal doped metal-oxide semiconductor: A review // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42, No 31. P. 20386–20397. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.066>.
5. Hübert T., Boon-Brett L., Buttner W. Sensors for Safety and Process Control in Hydrogen Technologies. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. 413 p. <https://doi.org/10.1201/b19141>.
6. Ilnicka A., Lukaszewicz J.P. Graphene-based hydrogen gas sensors: A review // Processes. 2020. V. 8, No 5. Art. 633. <https://doi.org/10.3390/pr8050633>.

7. Wang G., Dai J., Yang M. Fiber-optic hydrogen sensors: A review // IEEE Sens. J. 2020. V. 21, No 11. P. 12706–12718. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3029519>.
8. Салихов Х.М. Оптоэлектронные сенсоры водорода на основе диодов Шоттки на кремнии и гетероструктурах полупроводников АЗВ5. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 101 с.
9. Kafil V., Sreenan B., Hadj-Nacer M., Wang Y., Yoon J., Greiner M., Chu P., Wang X., Fadali M.S., Zhu X. Review of noble metal and metal-oxide-semiconductor based chemiresistive hydrogen sensors // Sens. Actuators, A. 2024. V. 373. Art. 115440. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115440>.
10. Toksha B., Gupta P., Rahaman M. Hydrogen sensing with palladium-based materials: Mechanisms, challenges, and opportunities // Chem. – Asian J. 2024. V. 19, No 16. Art. e202400127. <https://doi.org/10.1002/asia.202400127>.
11. Mohan G., Gopakumar N.N., Hsu M.-H., Chu Y.-R., Lin W.-C. Hydrogen-modulated magnetism in palladium-based nanostructures for sensing and reversible control of spintronic devices // J. Phys.: Mater. 2025. V. 8, No 4. Art. 042003. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ae1062>.
12. Lewis F.A. The Palladium Hydrogen System. London, New York, NY: Acad. Press, 1967. xii, 178 p.
13. Darmadi I., Nugroho F.A.A., Langhammer C. High-performance nanostructured palladium-based hydrogen sensors—current limitations and strategies for their mitigation // ACS Sens. 2020. V. 5, No 11. P. 3306–3327. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02019>.
14. Wang B., Sun L., Schneider-Ramelow M., Lang K.-D., Ngo H.-D. Recent advances and challenges of nanomaterials-based hydrogen sensors // Micromachines. 2021. V. 12, No 11. Art. 1429. <https://doi.org/10.3390/mi12111429>.
15. Krishna Kumar M., Ramachandra Rao M.S., Ramaprabhu S. Structural, morphological and hydrogen sensing studies on pulsed laser deposited nanostructured palladium thin films // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39, No 13. P. 2791–2795. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/13/023>.
16. RaviPrakash J., McDaniel A.H., Horn M., Piloni L., Sunal P., Messier R., McGrath R.T., Schweighardt F.K. Hydrogen sensors: Role of palladium thin film morphology // Sens. Actuators, B. 2007. V. 120, No 2. P. 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.02.050>.
17. Noh H.-J., Kim H.-J., Park Y.M., Park J.-S., Lee H.-N. Complex behavior of hydrogen sensor using nanoporous palladium film prepared by evaporation // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 480. P. 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.088>.
18. Hu Y., Lei J., Wang Z., Yang S., Luo X., Zhang G., Chen W., Gu H. Rapid response hydrogen sensor based on nanoporous Pd thin films // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41, No 25. P. 10986–10990. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.101>.
19. Jiao Y., Chen W., Qiaogen Z., Pei Z., Feng L., Cao P. Grain structure regulation: A novel approach to enhance the sensitivity and baseline stability of palladium thin film resistive hydrogen sensors // Int. J. Hydrogen Energy. 2025. V. 143. P. 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.005>.
20. Sousanis A., Biskos G. Thin film and nanostructured Pd-based materials for optical H₂ sensors: A review // Nanomaterials. 2021. V. 11, No 11. Art. 3100. <https://doi.org/10.3390/nano11113100>.

21. Shen C., Xie Z., Huang Z., Yan S., Sui W., Zhou J., Wang Z., Han W., Zeng X. Review of the status and prospects of fiber optic hydrogen sensing technology // *Chemosensors*. 2023. V. 11, No 9. Art. 473. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11090473>.
22. Шутаев В.А., Гребенщикова Е.А., Матвеев В.А., Губанова Н.Н., Яковлев Ю.П. Кинетика изменения оптической прозрачности нанопленок палладия при взаимодействии с водородом // *Оптика и спектроскопия*. 2023. Т. 131, № 3. С. 419–423. <https://doi.org/10.21883/OS.2023.03.55393.4368-22>.
23. Avila J.I., Matelon R.J., Trabol R., Favre M., Lederman D., Volkmann U.G., Cabrera A.L. Optical properties of Pd thin films exposed to hydrogen studied by transmittance and reflectance spectroscopy // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107, No 2. Art. 023504. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3272047>.
24. Шутаев В.А., Гребенщикова Е.А., Сидоров В.Г., Яковлев Ю.П. Влияние водорода на оптическую прозрачность слоев палладия // *Оптика и спектроскопия*. 2020. Т. 128, № 5. С. 603–606. <http://doi.org/10.21883/OS.2020.05.49316.276-19>.
25. Шутаев В.А., Матвеев В.А., Гребенщикова Е.А., Щелоков В.Г., Яковлев Ю.П. Оптические и структурные свойства нанопленок палладия в атмосфере водорода // *Оптика и спектроскопия*. 2021. Т. 129, № 9. С. 1183–1187. <http://doi.org/10.21883/OS.2021.09.51348.1963-21>.
26. Corso A.J., Tessarolo E., Guidolin M., Gaspera E.D., Martucci A., Angiola M., Donazzan A., Pelizzio M.G. Room-temperature optical detection of hydrogen gas using palladium nano-islands // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43, No 11. P. 5783–5792. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.183>.
27. Bannenberg L.J., Nugroho F.A.A., Schreuders H., Norder B., Trinh T.T., Steinke N.-J., van Well A.A., Langhammer C., Dam B. Direct comparison of PdAu alloy thin films and nanoparticles upon hydrogen exposure // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. V. 11, No 17. P. 15489–15497. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b22455>.
28. Čížek J., Melikhova O., Vlček M., Lukáč F., Vlach M., Procházka I., Anward W., Brauer G., Mücklich A., Wagner S., Uchida H., Pundt A. Hydrogen-induced microstructural changes of Pd films // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2013. V. 38, No 27. P. 12115–12125. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.096>.
29. Čížek J., Melikhova O., Vlček M., Lukáč F., Vlach M., Dobron P., Procházka I., Anward W., Brauer G., Wagner S., Uchida H., Gemma R., Pundt A. Hydrogen interaction with defects in nanocrystalline, polycrystalline and epitaxial Pd films // *J. Nano Res.* 2014. V. 26. P. 123–133. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.26.123>.
30. Lukáč F., Vlček M., Vlach M., Wagner S., Uchida H., Pundt A., Bell A., Čížek J. Stress release during cyclic loading of 20 nm palladium films // *J. Alloys Compd.* 2015. V. 645, Suppl. 1. P. S450–S453. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.085>.
31. Wagner T., Richter G., Rühle M. Epitaxy of Pd thin films on (100) SrTiO₃: A three-step growth process // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89, No 5. P. 2606–2612. <https://doi.org/10.1063/1.1338987>.
32. Esmaeili A., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Vakhitov I.R., Gabbasov B.F., Kiiamov A.G., Rogov A.M., Osin Yu.N., Denisov A.E., Yusupov R.V., Tagirov L.R. Epitaxial growth of Pd_{1-x}Fe_x films on MgO single-crystal substrate // *Thin Solid Films*. 2019. V. 669. P. 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.015>.

References

1. Yarullin R.S., Ugryumov O.V., Vasyukov S.I., Tkacheva V.E. *Vodorod – toplivo budushchego: analiticheskii obzor* [Hydrogen – Fuel of the Future: An Analytical Review]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 2018. 544 p. URL: <https://dspace.kpfu.ru/xmlui/viewer?file=163354;vodorod-toplivo-budushchego.pdf>. (In Russian)
2. Mitrova T., Mel'nikov Yu., Chugunov D. *Vodorodnaya ekonomika – put' k nizkouglerodnomu razvitiyu* [Hydrogen Economy – The Path to Low-Carbon Development]. Moscow, Skolkovo, 2019. 62 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15540.91524>. (In Russian)
3. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. Hydrogen sensors – a review. *Sens. Actuators, B*, 2011, vol. 157, no. 2, pp. 329–352. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.04.070>.
4. Luo Y., Zhang C., Zheng B., Geng X., Debliquy M. Hydrogen sensors based on noble metal doped metal-oxide semiconductor: A review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 31, pp. 20386–20397. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.066>.
5. Hübert T., Boon-Brett L., Buttner W. *Sensors for Safety and Process Control in Hydrogen Technologies*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2016. 413 p. <https://doi.org/10.1201/b19141>.
6. Ilnicka A., Lukaszewicz J.P. Graphene-based hydrogen gas sensors: A review. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 5, art. 633. <https://doi.org/10.3390/pr8050633>.
7. Wang G., Dai J., Yang M. Fiber-optic hydrogen sensors: A review. *IEEE Sens. J.*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 12706–12718. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3029519>.
8. Salikhov Kh.M. *Optoelektronnyye sensory vodoroda na osnove diodov Shottki na kremnii i geterostrukturakh poluprovodnikov A3B5* [Optoelectronic Hydrogen Sensors Based on Schottky Diodes on Silicon and A3B5 Semiconductor Heterostructures]. St. Petersburg, Izd. Politekh. Univ., 2010. 101 p. (In Russian)
9. Kafil V., Sreenan B., Hadj-Nacer M., Wang Y., Yoon J., Greiner M., Chu P., Wang X., Fadali M.S., Zhu X. Review of noble metal and metal-oxide-semiconductor based chemiresistive hydrogen sensors. *Sens. Actuators, A*, 2024, vol. 373, art. 115440. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115440>.
10. Toksha B., Gupta P., Rahaman M. Hydrogen sensing with palladium-based materials: Mechanisms, challenges, and opportunities. *Chem. – Asian J.*, 2024, vol. 19, no. 16, art. e202400127. <https://doi.org/10.1002/asia.202400127>.
11. Mohan G., Gopakumar N.N., Hsu M.-H., Chu Y.-R., Lin W.-C. Hydrogen-modulated magnetism in palladium-based nanostructures for sensing and reversible control of spintronic devices. *J. Phys.: Mater.*, 2025, vol. 8, no. 4, art. 042003. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ae1062>.
12. Lewis F.A. *The Palladium Hydrogen System*. London, New York, NY, Acad. Press, 1967. xii, 178 p.
13. Darmadi I., Nugroho F.A.A., Langhammer C. High-performance nanostructured palladium-based hydrogen sensors—current limitations and strategies for their mitigation. *ACS Sens.*, 2020, vol. 5, no. 11, pp. 3306–3327. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02019>.
14. Wang B., Sun L., Schneider-Ramelow M., Lang K.-D., Ngo H.-D. Recent advances and challenges of nanomaterials-based hydrogen sensors. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 11, art. 1429. <https://doi.org/10.3390/mi12111429>.

15. Krishna Kumar M., Ramachandra Rao M.S., Ramaprabhu S. Structural, morphological and hydrogen sensing studies on pulsed laser deposited nanostructured palladium thin films. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, vol. 39, no. 13, pp. 2791–2795. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/13/023>.
16. RaviPrakash J., McDaniel A.H., Horn M., Pilione L., Sunal P., Messier R., McGrath R.T., Schweighardt F.K. Hydrogen sensors: Role of palladium thin film morphology. *Sens. Actuators, B*, 2007, vol. 120, no. 2, pp. 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.02.050>.
17. Noh H.-J., Kim H.-J., Park Y.M., Park J.-S., Lee H.-N. Complex behavior of hydrogen sensor using nanoporous palladium film prepared by evaporation. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 480, pp. 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.088>.
18. Hu Y., Lei J., Wang Z., Yang S., Luo X., Zhang G., Chen W., Gu H. Rapid response hydrogen sensor based on nanoporous Pd thin films. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, no. 25, pp. 10986–10990. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.101>.
19. Jiao Y., Chen W., Qiaogen Z., Pei Z., Feng L., Cao P. Grain structure regulation: A novel approach to enhance the sensitivity and baseline stability of palladium thin film resistive hydrogen sensors. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2025, vol. 143, pp. 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.005>.
20. Sousanis A., Biskos G. Thin film and nanostructured Pd-based materials for optical H₂ sensors: A review. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 11, art. 3100. <https://doi.org/10.3390/nano11113100>.
21. Shen C., Xie Z., Huang Z., Yan S., Sui W., Zhou J., Wang Z., Han W., Zeng X. Review of the status and prospects of fiber optic hydrogen sensing technology. *Chemosensors*, 2023, vol. 11, no. 9, art. 473. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11090473>.
22. Shutaev V.A., Grebenshchikova E.A., Matveev V.A., Gubanov N.N., Yakovlev Yu.P. Kinetics of changing in optical transmittance of palladium nanolayers during interaction with hydrogen. *Opt. Spectrosc.*, 2023, vol. 131, no. 3, pp. 178–182. <https://doi.org/10.1134/S0030400X23040185>.
23. Avila J.I., Matelon R.J., Trabol R., Favre M., Lederman D., Volkmann U.G., Cabrera A.L. Optical properties of Pd thin films exposed to hydrogen studied by transmittance and reflectance spectroscopy. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, no. 2, art. 023504. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3272047>.
24. Shutaev V.A., Grebenshchikova E.A., Sidorov V.G., Yakovlev Yu.P. The influence of hydrogen on the optical transparency of palladium layers. *Opt. Spectrosc.*, 2020, vol. 128, no. 5, pp. 596–599. <http://doi.org/10.1134/S0030400X20050148>.
25. Shutaev V.A., Matveev V.A., Grebenshchikova E.A., Shchelokov V.G., Yakovlev Yu.P. Optical and structural properties of palladium nanofilms in hydrogen atmosphere. *Opt. Spectrosc.*, 2021, vol. 129, no. 12, pp. 1306–1310. <http://doi.org/10.1134/S0030400X21090204>.
26. Corso A.J., Tessarolo E., Guidolini M., Gaspera E.D., Martucci A., Angiola M., Donazzan A., Pelizzio M.G. Room-temperature optical detection of hydrogen gas using palladium nano-islands. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 11, pp. 5783–5792. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.183>.
27. Bannenberg L.J., Nugroho F.A.A., Schreuders H., Norder B., Trinh T.T., Steinke N.-J., van Well A.A., Langhammer C., Dam B. Direct comparison of PdAu alloy thin films and

- nanoparticles upon hydrogen exposure. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, vol. 11, no. 17, pp. 15489–15497. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b22455>.
28. Čížek J., Melikhova O., Vlček M., Lukáč F., Vlach M., Procházka I., Anward W., Brauer G., Mücklich A., Wagner S., Uchida H., Pundt A. Hydrogen-induced microstructural changes of Pd films. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, no. 27, pp. 12115–12125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.096>.
29. Čížek J., Melikhova O., Vlček M., Lukáč F., Vlach M., Dobron P., Procházka I., Anward W., Brauer G., Wagner S., Uchida H., Gemma R., Pundt A. Hydrogen interaction with defects in nanocrystalline, polycrystalline and epitaxial Pd films. *J. Nano Res.*, 2014, vol. 26, pp. 123–133. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.26.123>.
30. Lukáč F., Vlček M., Vlach M., Wagner S., Uchida H., Pundt A., Bell A., Čížek J. Stress release during cyclic loading of 20 nm palladium films. *J. Alloys Compd.*, 2015, vol. 645, suppl. 1, pp. S450–S453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.085>.
31. Wagner T., Richter G., Rühle M. Epitaxy of Pd thin films on (100) SrTiO₃: A three-step growth process. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, no. 5, pp. 2606–2612. <https://doi.org/10.1063/1.1338987>.
32. Esmaeili A., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Vakhitov I.R., Gabbasov B.F., Kiiamov A.G., Rogov A.M., Osin Yu.N., Denisov A.E., Yusupov R.V., Tagirov L.R. Epitaxial growth of Pd_{1-x}Fe_x films on MgO single-crystal substrate. *Thin Solid Films*, 2019, vol. 669, pp. 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.015>.

Информация об авторах

Игорь Витальевич Янилкин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет
E-mail: yanilkin-igor@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8879-8904>

Андрей Вячеславович Петров, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет
E-mail: flypetrov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3202-2477>

Амир Илдусович Гумаров, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет
E-mail: amir@gumarov.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7250-4377>

Алексей Михайлович Рогов, инженер научно-исследовательской лаборатории «Внутрипластовое горение», Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
E-mail: Aleksej.Rogov@kpfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7086-4280>

Булат Ринатович Буляков, научный сотрудник лаборатории новых материалов и перспективных технологий, Институт прикладных исследований, Академия наук Республики Татарстан; аспирант, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: bulyakov.bulat@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7021-0609>

Роман Валерьевич Юсупов, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: Roman.Yusupov@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7516-2392>

Ленар Рафгатович Тагиров, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»; заведующий лабораторией новых материалов и перспективных технологий, Институт прикладных исследований, Академия наук Республики Татарстан

E-mail: ltagirov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1549-7940>

Author Information

Igor V. Yanilkin, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, S.A. Altshuler Laboratory for Magnetic Radiospectroscopy and Quantum Electronics, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: yanilkin-igor@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8879-8904>

Andrey V. Petrov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Researcher, S.A. Altshuler Laboratory for Magnetic Radiospectroscopy and Quantum Electronics, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: flypetrov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3202-2477>

Amir I. Gumarov, Senior Researcher, S.A. Altshuler Laboratory for Magnetic Radiospectroscopy and Quantum Electronics, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: amir@gumarov.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7250-4377>

Alexey M. Rogov, Engineer, In-Situ Combustion Laboratory, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University

E-mail: Aleksej.Rogov@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7086-4280>

Bulat R. Bulyakov, Researcher, Laboratory of New Materials and Advanced Technologies, Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences; Postgraduate Student, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: bulyakov.bulat@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7021-0609>

Roman V. Yusupov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Department of Quantum Electronics and Radiospectroscopy, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: Roman.Yusupov@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7516-2392>

Lenar R. Tagirov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Head of Laboratory of New Materials and Advanced Technologies, Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences

E-mail: *ltagirov@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1549-7940>

Поступила в редакцию 20.04.2026

Принята к публикации 22.05.2026

Received April 20, 2026

Accepted May 22, 2026