

Научная статья
УДК 621.383.51
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17302>

СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ФОСФИДА БОРА НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

А. И. Баранов¹ ✉, Г. Э. Вторьгин¹, А. В. Уваров¹,
А. А. Максимова^{2,1}, Е. А. Вячеславова¹, А. С. Гудовских^{1,2}

¹ Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ itiomchik@yandex.ru

Аннотация. Проведены исследования слоев фосфида бора ВР и гетеропереходов ВР/*n*-Si, сформированных методом плазмохимического осаждения при температуре 350 °С на подложках *n*-Si с использованием диборана и фосфина. Установлено, что увеличение мощности водородной плазмы позволяет избежать пиннинга уровня Ферми на границе ВР/*n*-Si. Дополнительное разбавление потоком водорода приводило к увеличению проводимости слоя ВР, а поведение вольтамперной характеристики структуры Au/ВР/*n*-Si (золотой электрод) становилось выпрямляющим. Методом спектроскопии полной проводимости были обнаружены поверхностные состояния электронов на границах ВР/*n*-Si во всех образцах и глубокие электронные уровни с энергией 0,58 – 0,65 эВ в слоях ВР, выращенных без дополнительного потока водорода.

Ключевые слова: фосфид бора, плазмохимическое осаждение, спектроскопия полной проводимости, поверхностные состояния

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10413, <https://rscf.ru/project/21-79-10413/>.

Для цитирования: Баранов А. И., Вторьгин Г. Э., Уваров А. В., Максимова А. А., Вячеславова Е. А., Гудовских А. С. Спектроскопия полной проводимости гетероструктур фосфида бора на кремниевых подложках, полученных методом плазмохимического осаждения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 3. С. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17302>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17302>

ADMITTANCE SPECTROSCOPY OF BORON PHOSPHIDE HETEROSTRUCTURES GROWN BY PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION ON SILICON SUBSTRATES

A. I. Baranov¹ ✉, G. E. Vtorygin¹, A. V. Uvarov¹,
A. A. Maksimova^{2,1}, E. A. Vyacheslavova^{1,2}, A. S. Gudovskikh^{1,2}

¹ Alferov University, St. Petersburg, Russia;

² Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

✉ itiomchik@yandex.ru

Abstract. The study of BP layers and BP/*n*-Si heterojunctions formed by plasma enhanced chemical deposition on *n*-Si substrates has been carried out at a temperature of 350 °C using diborane and phosphine. The additional enhancement of hydrogen plasma power was established to make it possible to avoid pinning of the Fermi level at the BP/*n*-Si interface. Moreover, additional dilution with a hydrogen flow led to an increase in the BP layer conductivity, and the behavior of the current-voltage characteristic of the Au/BP/*n*-Si structure (golden electrode) became rectifying. Surface states of electrons at the BP/*n*-Si heterojunctions in all the samples and deep electronic levels with energy 0.58–0.65 eV in BP layers grown without the additional hydrogen flow were detected by admittance spectroscopy.

Keywords: boron phosphide, plasma enhanced chemical vapor deposition, admittance spectroscopy, interface states

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 21-79-10413, <https://rscf.ru/project/21-79-10413/>).

For citation: Baranov A. I., Vtorygin G. E., Uvarov A. V., Maksimova A. A., Vyacheslavova E. A., Gudovskikh A. S., Admittance spectroscopy of boron phosphide heterostructures grown by plasma enhanced chemical vapor deposition on silicon substrates, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (3) (2024) 17–24. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17302>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

В настоящее время идет активный поиск новых полупроводниковых материалов для замены аморфного кремния, который служит в качестве эмиттера в солнечных элементах на подложках монокристаллического кремния. В работе [1] теоретически было показано, что фосфид бора BP является одним из наиболее перспективных бинарных соединений для создания эмиттера *p*-типа к кремниевым подложкам *n*-Si, поскольку является непрямозонным, а также обладает большим различием между энергиями непрямого (2 эВ) и прямого (4 эВ) переходов, что приводит к большому разрыву зоны проводимости на гетеропереходе *p*-BP/*n*-Si и создает предпосылки для формирования селективного контакта для дырок. Опубликовано всего несколько работ по выращиванию BP плазмохимическими и эпитаксиальными методами [2 – 4], причем в них исследовали исключительно структурные свойства слоев.

В нашей предыдущей работе [5] были изучены электрофизические свойства слоев BP, выращенных методом плазмохимического осаждения в температурном интервале 250 – 350 °C; для них было установлено значительное встраивание атомов углерода при использовании триметилбора как источника бора. Для структур на основе этих слоев наблюдался пиннинг уровня Ферми на гетерогранице BP/*n*-Si. По этой причине, в последующих экспериментах в качестве источника бора был использован диборан [6], что позволило добиться увеличения оптической ширины запрещенной зоны BP до 1,9 эВ. При этом в спектрах комбинационного рассеяния объекта отсутствовали пики, отвечающие углероду, что указывало на его аморфизацию [7].

Цель настоящей работы – представить результаты изучения и анализ электрофизических свойств слоев фосфида бора и гетеропереходов BP /*n*-Si на их основе, выращенных с использованием диборана и фосфина.

Экспериментальная часть

Создание структур. Осаждение слоев BP было проведено в установке плазмохимического осаждения Oxford PlasmaLab 100 PECVD (13,56 МГц), снабженной линиями фосфина PH₃ и диборана B₂H₆, служащими источниками атомов фосфора и бора, соответственно. Использовались 100%-й газ фосфин PH₃ и 2%-я газовая смесь диборана в водороде (B₂H₆/H₂). Слои фосфида бора осаждались на трехдюймовые полированные подложки монокристаллического кремния толщиной 380 мкм.

Эти подложки были изготовлены методом Чохральского, были легированы фосфором и обладали удельным электрическим сопротивлением 5 – 10 Ом·см. Непосредственно перед загрузкой в рабочую камеру подложки кремния обрабатывали в 10%-м водном растворе плавиковой кислоты (HF/H₂O) для снятия естественного оксида. Слои фосфида бора осаждались при фиксированной температуре 350 °С и одинаковом давлении 1000 мТорр при соотношении потоков газовой смеси и газа B₂H₆/H₂ : PH₃ = 2 : 1 в течение 20 мин с разной мощностью плазмы (20 и 200 Вт) и дополнительным разбавлением водородом (100 см³/мин) (см. таблицу). Полученные значения толщины выращенных слоев также представлены в таблице.

Таблица

Условия выращивания и значения толщины выращенных слоев фосфида бора

Процесс	Разбавление газом H ₂	Мощность плазмы, Вт	Толщина, нм
I	He использовалось	20	285
II		200	276
III	100 см ³ /мин	200	360

Примечание. Температура выращивания слоев составляла 350 °С, давление – 1000 мТорр.

На тыльной стороне подложки кремния был сформирован омический контакт путем осаждения тонкого (5 нм) высоколегированного слоя фосфида галлия *n*-GaP с последующим термическим напылением серебра Ag в установке ВРС Edwards Auto500. На лицевую сторону образцов фосфида бора было термически нанесено золото Au через маску с отверстиями диаметром 1 мм для формирования барьера Шоттки.

Измерения. Вольтамперные характеристики образцов были зарегистрированы при комнатной температуре с использованием прецизионного источника-измерителя Keithley 2400.

Измерения спектроскопии полной проводимости были проведены с помощью прецизионного RLC-метра Keysight E4980A-001 на частотах от 20 Гц до 2 МГц с амплитудой тестового сигнала 50 мВ в гелиевом криостате замкнутого цикла Janis CCS-400H/204 в температурном диапазоне от 40 до 400 К.

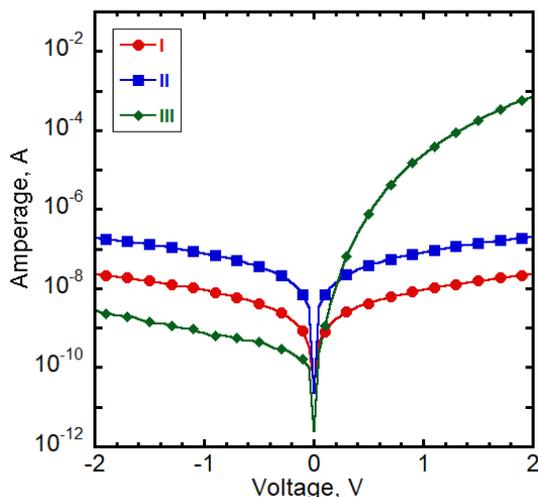


Рис. 1. Вольтамперные характеристики образцов структуры Au/BP/*n*-Si, выращенных при разных условиях (см. таблицу)

Результаты и их обсуждение

Полученные темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) показаны на рис. 1. Анализ этих зависимостей позволяет заключить, что слои, которые выращивали без разбавления водородом, демонстрируют симметричные графики при прямом и обратном напряжениях смещения, причем проводимость слоя фосфида бора возрастает при повышении мощности плазмы с 20 до 200 Вт. Добавление в газовую смесь потока водорода 100 см³/мин приводит к тому, что на ВАХ наблюдается выпрямляющий эффект: при наложении положительного потенциала возникает экспоненциальный рост тока

через образец, а отрицательного – слабый ток, что свидетельствует о существовании области пространственного заряда на границе раздела золотого электрода и фосфида бора (Au/BP), что обусловлено наличием потенциального барьера.

Ранее в работе [8] было показано, что полученные слои обладают донорным типом проводимости. Такой результат позволил провести измерения вольтфарадных характеристик при разных температурах. Согласно полученным данным, емкость образца, выращенного в плазме с низкой мощностью, слабо зависит от приложенного напряжения в диапазоне от -20 до $+20$ В при различных температурах. Это связано с тем, что ширина области пространственного заряда в кремнии не изменяется при варьировании напряжения вследствие пиннинга уровня Ферми; пиннинг формируется ввиду большой концентрации дефектов на гетерогранице. Аналогичное явление наблюдалось нами ранее для тонких слоев BP, выращенных с прекурсором триметилбора при различных параметрах плазмы [5]. Однако при выращивании структуры с использованием диборана удалось провести профилирование структуры Au/BP/*n*-Si, благодаря повышению мощности плазмы до 200 Вт и разбавлению водородом газовых потоков. Установлено, что при низких значениях температуры (менее 100 К) область пространственного заряда распространяется на кремниевую подложку, если приложить обратное смещение ($V \leq 0$ В). По мере повышения температуры величина обратного напряжения, при котором начинается профилирование кремния, растет, и при комнатной температуре следует прикладывать гораздо большие отрицательные напряжения (ниже -4 В), чем при температуре 100 К. Такое поведение зависимости может быть связано с наличием дефектов в слоях фосфида бора и на границах раздела BP/*n*-Si. Полученные данные указывали на целесообразность измерений методом спектроскопии полной проводимости; последняя позволяет детектировать дефекты такого типа.

На рис. 2 представлены зарегистрированные спектры емкость – частота для всех образцов при нулевом постоянном смещении. Наблюдаемые ступени емкости означают дополнительный вклад в емкость образца. Этот вклад может быть обусловлен откликом с точечного дефектного уровня или обменом носителями на поверхностных состояниях, сформированных на гетерограницах BP/Si.

В образцах, выращенных при 200 Вт, наблюдается подобная серия ступеней в диапазоне 100 – 180 К, которая отвечает отклику с энергией активации 0,19 и 0,17 эВ для образцов, выращенных с разбавлением водородом (см. рис. 2, *c*), и без разбавления (см. рис. 2, *b*), соответственно. Кроме того, установлено, что при увеличении амплитуды приложенного обратного смещения (от -1 до -4 В) ступень емкости смещается в сторону больших частот при одной и той же температуре. Это и приводит при значении смещения -4 В к увеличению расчетной энергии активации этого отклика: до 0,82 и 0,46 эВ для образцов, выращенных с разбавлением водородом, и без разбавления, соответственно (данные на рис. 2 не представлены).

Зависимость энергии активации от напряжения свидетельствует об отклике от поверхностных состояний на гетерогранице BP/Si. Согласно результатам компьютерного моделирования, выполненного в среде AFORS-НЕТ, отклик связан в данном случае с переходом электронов с поверхностных состояний в зону проводимости кремния: когда прикладывается обратное напряжение смещения, квазиуровень Ферми сдвигается в сторону середины запрещенной зоны, что приводит к повышению энергии перехода. Полученный результат объясняет наблюдаемые ранее температурные зависимости вольтфарадных характеристик [8]. При низких температурах изотипный гетеропереход Au/BP/*n*-Si характеризуется классическим поведением, где слой BP является полностью обедненным из-за слабого легирования. При $V_{DC} = 0$ В, область пространственного заряда распространяется на кремний, а при обратном напряжении смещения происходит профилирование концентрации носителей заряда в кремниевой подложке. Расчетная зонная диаграмма структуры Au/BP/*n*-Si при 100 К показана на рис. 3, *a*. Однако при увеличении температуры поверхностные состояния вызывают появление дополнительного заряда на гетерогранице BP/*n*-Si, что приводит к изменению формы изгиба зон. Это изменение, в свою очередь, требует приложения большей амплитуды обратного смещения для обеднения области кремния на границе с фосфидом бора при определенной тестовой частоте (зонная диаграмма при 300 К представлена на рис. 3, *b*).

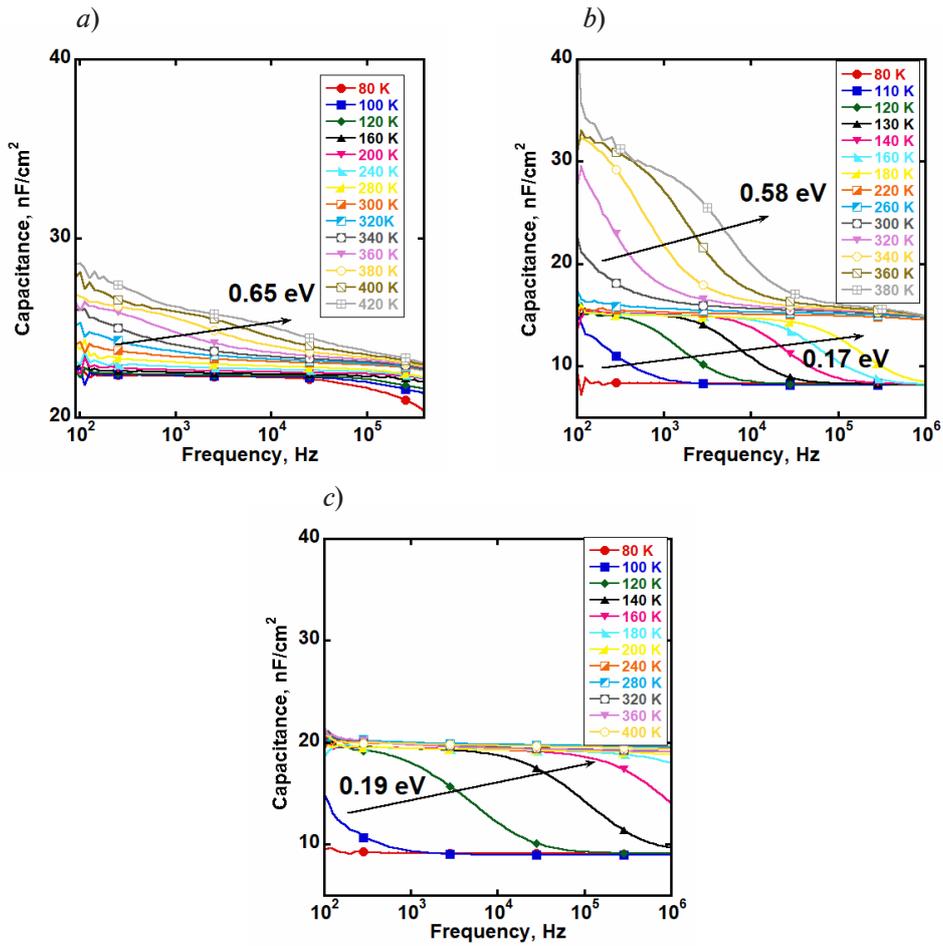


Рис. 2. Частотные зависимости емкости образцов I (a), II (b), III (c) структуры Au/BP/n-Si (см. таблицу) для разных значений температуры, при постоянном нулевом смещении.

Показаны значения энергии активации откликов; энергии глубоких уровней $E_a = 0,17 - 0,19$ эВ и $E_a = 0,58 - 0,65$ эВ

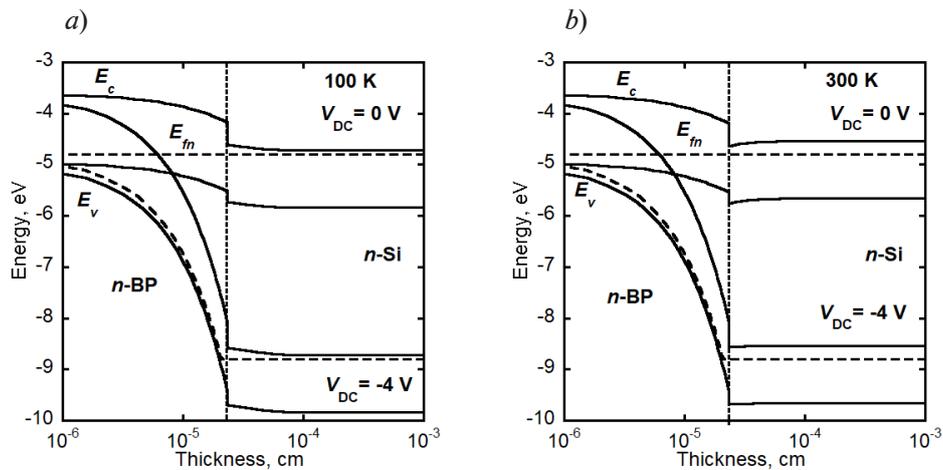


Рис. 3. Зонные диаграммы гетероперехода Au/BP/n-Si при 100 К (a) и 300 К (b) при разных значениях смещения V_{DC} (при наличии поверхностных состояний на границе BP/n-Si).

Представлены энергетические положения дна зоны проводимости E_c , квазиуровня Ферми для электронов E_{fn} и потолка валентной зоны E_v

В обоих образцах, выращенных без дополнительного потока водорода, был детектирован высокотемпературный дефект с энергиями активации 0,65 и 0,58 эВ для процессов с мощностью плазмы 20 и 200 Вт соответственно. При этом значения не зависят от приложенного постоянного напряжения смещения, в отличие от откликов, описанных выше; следовательно обнаруженный дефект связан с дефектным уровнем в слое фосфида бора. Поскольку изучение дефектов в слоях ВР емкостными методами проведено впервые, его природа неизвестна на данный момент, однако резонно предположить, что он является глубоким уровнем, связанным со структурными свойствами слоя, чему будут посвящены будущие эксперименты.

Заключение

Впервые емкостными методами были исследованы гетеропереходы ВР/*n*-Si, полученные методом плазмохимического осаждения слоев фосфида бора ВР с потоками диборана и фосфина. Использование диборана вместо триметилбора в качестве источника бора позволило избавиться от пиннинга уровня Ферми на гетерогранице ВР/*n*-Si при увеличении мощности плазмы с 20 до 200 Вт. Устранение пиннинга обусловлено отсутствием паразитного встраивания углерода в структуру и улучшением стехиометрического состава ВР, а введение дополнительного потока водорода для разбавления газовой смеси увеличило проводимость слоя *n*-ВР. Тем не менее, на границе ВР/*n*-Si формируются поверхностные состояния (обнаружены методом спектроскопии полной проводимости); их наличие генерирует появление дополнительного заряда на границе при комнатной температуре, поэтому необходимо прикладывать гораздо большие обратные напряжения для распространения обедненной области на подложку кремния. Кроме того, в слоях фосфида бора, выращенных без дополнительного потока водорода, обнаружены глубокие уровни с энергиями $E_a = 0,58 - 0,65$ эВ.

Таким образом, оптимальным является рост слоев фосфида бора с потоком диборана при большой мощности плазмы (200 Вт) и с дополнительным разбавлением водородом (значение потока – 100 см³/мин), так как это обеспечивает меньшее дефектообразование в слоях фосфида бора и на границе ВР/*n*-Si.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Varley J. B., Miglio A., Ha V.-A., van Setten M. J., Rignanese G.-M., Hautier G. High-throughput design of non-oxide *p*-type transparent conducting materials: Data mining, search strategy, and identification of boron phosphide // *Chemistry of Materials*. 2017. Vol. 29. No. 6. Pp. 2568–2573.
2. Ogwu A. A., Hellwig T., Haddow D. Fracture and yield behaviour of wear and erosion resistant boron phosphide coatings for aerospace and automotive applications // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 75. No. 1. Pp. 30–34.
3. Nishimura S., Hanamoto H., Terashima K., Matsumoto S. Growth of GaN on Si(100) substrates using BP as a buffer layer – selective epitaxial growth // *Materials Science and Engineering B*. 2002. Vol. 93. No. 1–3. Pp. 135–138.
4. Padavala B., Frye C. D., Wang X., Raghobhamachar B., Edgar J. H. CVD growth and properties of boron phosphide on 3C-SiC // *Journal of Crystal Growth*. 2016. Vol. 449. 1 September. Pp. 15–21.
5. Maksimova A. A., Uvarov A. V., Baranov A. I., et al. Investigation of plasma deposited boron phosphide and its contact to silicon // *ACS Applied Energy Materials*. 2022. Vol. 5. No. 5. Pp. 5367–5373.
6. Maksimova A. A., Uvarov A. V., Pozdeev V. A., Kirilenko D. A., Baranov A. I., Vyacheslavova E. A., Gudovskikh A. S. Boron phosphide grown by PECVD and its optical properties // *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. Vol. 16. No. 3.2. Pp. 273–277.
7. Максимова А. А., Уваров А. В., Вячеславова Е. А., Баранов А. И., Гудовских А. С. Разработка технологии плазмохимического осаждения фосфида бора при низкой температуре // *Физика твердого тела*. 2023. Т. 16. № 12. С. 2198–2200.
8. Vtorygin G. E., Baranov A. I., Uvarov A. V., Maksimova A. A., Vyacheslavova E. A. Capacitance-voltage characterization of BP layers grown by PECVD mode // *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. Vol. 16. No. 3.1. Pp. 473–478.



REFERENCES

1. Varley J. B., Miglio A., Ha V.-A., et al., High-throughput design of non-oxide *p*-type transparent conducting materials: Data mining, search strategy, and identification of boron phosphide, *Chem. Mater.* 29 (6) (2017) 2568–2573.
2. Ogwu A. A., Hellwig T., Haddow D., Fracture and yield behaviour of wear and erosion resistant boron phosphide coatings for aerospace and automotive applications, *Arch. Mater. Sci. Eng.* 75 (1) (2015) 30–34.
3. Nishimura S., Hanamoto H., Terashima K., Matsumoto S., Growth of GaN on Si(100) substrates using BP as a buffer layer – selective epitaxial growth, *Mater. Sci. Eng. B.* 93 (1–3) (2002) 135–138.
4. Padavala B., Frye C. D., Wang X., et al., CVD growth and properties of boron phosphide on 3C-SiC, *J. Cryst. Growth.* 449 (1 Sept) (2016) 15–21.
5. Maksimova A. A., Uvarov A. V., Baranov A. I., et al., Investigation of plasma deposited boron phosphide and its contact to silicon, *ACS Appl. Energy Mater.* 5 (5) (2022) 5367–5373.
6. Maksimova A. A., Uvarov A. V., Pozdeev V. A., et al., Boron phosphide grown by PECVD and its optical properties, *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics.* 16 (3.2) (2023) 273–277.
7. Maksimova A. A., Uvarov A. V., Vyacheslavova E. A., et al., Development of technology for plasma-enhanced chemical vapor deposition of boron phosphide at low temperatures, *Phys. Solid State.* 16 (12) (2023) 2107–2109.
8. Vtorygin G. E., Baranov A. I., Uvarov A. V., et al., Capacitance-voltage characterization of BP layers grown by PECVD mode, *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics.* 16 (3.1) (2023) 473–478.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРАНОВ Артем Игоревич – *PhD*, младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова, РАН, Санкт-Петербург, Россия

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
itiomchik@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4894-6503

ВТОРЫГИН Георгий Эдуардович – студент Академического университета им. Ж. И. Алфёрова, РАН, Санкт-Петербург, Россия

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
piespogany@gmail.com
ORCID: 0009-0008-5149-0157

УВАРОВ Александр Вячеславович – младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова, РАН, Санкт-Петербург, Россия

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
lumenlight@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0061-6687

МАКСИМОВА Алина Андреевна – аспирантка, ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина); младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

197376, Россия, г. Санкт Петербург, ул. Профессора Попова, 5
deer.blackgreen@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-3503-7458

ВЯЧЕСЛАВОВА Екатерина Александровна – аспирантка, младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова, РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
cate.viacheslavova@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-6869-1213

ГУДОВСКИХ Александр Сергеевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова, профессор кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), РАН, Санкт-Петербург, Россия

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
gudovskikh@spbau.ru
ORCID: 0000-0002-7632-3194

THE AUTHORS

BARANOV Artem I.

Alferov University
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
itiomchik@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4894-6503

VTORYGIN Georgii E.

Alferov University
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
piespogany@gmail.com
ORCID: 0009-0008-5149-0157

UVAROV Alexander V.

Alferov University
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
lumenlight@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0061-6687

MAKSIMOVA Alina A.

*St. Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Alferov University*
5 Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia
deer.blackgreen@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-3503-7458

VYACHESLAVOVA Ekaterina A.

Alferov University
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
cate.viacheslavova@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-6869-1213

GUDOVSKIKH Alexander S.

*Alferov University,
St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"*
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
gudovskikh@spbau.ru
ORCID: 0000-0002-7632-3194

*Статья поступила в редакцию 03.05.2024. Одобрена после рецензирования 21.05.2024.
Принята 21.05.2024.*

Received 03.05.2024. Approved after reviewing 21.05.2024. Accepted 21.05.2024.