Наноматериалы и нанотехнологии

Nanomaterials and nanotechnologies

УДК 539.23

ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В БЕЛОРУССКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

И. Н. ГРОМОВ[1), 2)]***, М. И. ДЕМИДЕНКО***[2)]***, В. К. КСЕНЕВИЧ***[1)]***,***
М. А. САМАРИНА[1)]***, Н. И. ВОЛЫНЕЦ***[2)]***, С. А. МАКСИМЕНКО***[2)]

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*
[2)]*Институт ядерных проблем БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220006, г. Минск, Беларусь*

Аннотация. Описан разработанный сотрудниками физического факультета БГУ и Института ядерных проблем БГУ научно-учебный лабораторный комплекс для синтеза графеноподобных и наноуглеродных материалов методом химического осаждения из газовой фазы. Отмечено, что целью создания данного комплекса является совершенствование образовательного процесса и материальной базы для проведения научных исследований в области наноматериалов и нанотехнологий в БГУ. Дана краткая характеристика комплекса, позволяющего синтезировать графен на медных и никелевых подложках, а также пленки пиролитического углерода с воспроизводимыми структурными свойствами, что подтверждается результатами анализа образцов методом комбинационного рассеяния света. Приведены типичные спектры комбинационного рассеяния света образцов, синтезированных с использованием лабораторного комплекса. Представлено краткое описание лабораторного практикума, внедренного в образовательный процесс физического факультета БГУ. Рассмотрены перспективы развития образования и научных исследований в области наноматериалов и нанотехнологий в названном университете.

Ключевые слова: углеродные наноматериалы; химическое осаждение из газовой фазы; графен; пиролитический углерод; алмазоподобный углерод; спектроскопия комбинационного рассеяния света.

Образец цитирования:
Громов ИН, Демиденко МИ, Ксеневич ВК, Самарина МА, Волынец НИ, Максименко СА. Перспективы научных исследований и образования в области физики углеродных наноматериалов в Белорусском государственном университете. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2025;2:74–84.
EDN: NJMDMC

For citation:
Gromov IN, Demidenko MI, Ksenevich VK, Samarina MA, Valynets NI, Maksimenko SA. Prospects of scientific research and education in the field of physics of carbon nanomaterials in Belarusian State University. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;2:74–84. Russian.
EDN: NJMDMC

Сведения об авторах см. на с. 73–74.

Information about the authors see p. 73–74.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственной научно-технической программы «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» на 2021–2025 гг. (подпрограмма «Научно-учебное оборудование», задания 57 и 67), государственной программы научных исследований «Конвергенция-2025» (подпрограмма «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии», задание 3.02.2), а также государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» (подпрограмма «Наноструктура», задание 2.14.3). Авторы выражают признательность О. В. Королик за проведение измерений спектров комбинационного рассеяния света образцов графена и пленок пиролитического углерода.

PROSPECTS OF SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE FIELD OF PHYSICS OF CARBON NANOMATERIALS IN BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

***I. N. GROMOV*[a, b], *M. I. DEMIDENKO*[b], *V. K. KSENEVICH*[a], *M. A. SAMARINA*[a], *N. I. VALYNETS*[b], *S. A. MAKSIMENKO*[b]**

[a]*Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*
[b]*Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, 11 Babrujskaja Street, Minsk 220006, Belarus*
Corresponding author: I. N. Gromov (gromov-igor.post@yandex.by)

Abstract. The scientific and educational laboratory complex developed by employees of the faculty of physics of Belarusian State University and the Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, for the synthesis of graphene-like and nanocarbon materials by chemical vapour deposition is described. It is noted that the purpose of creating this complex is to improve the educational process and material base for conducting scientific research in the field of nanomaterials and nanotechnologies in BSU. It is given a brief description of the complex that allows the synthesis of graphene on copper and nickel substrates, as well as pyrolytic carbon films with reproducible structural properties, which is confirmed by the results of sample analysis using the Raman spectroscopy. Typical Raman spectra of samples synthesised using the laboratory complex are presented. A brief description of the laboratory workshop introduced into the educational process of the faculty of physics of BSU is provided. The prospects for the development of the education and scientific research in the field of nanomaterials and nanotechnologies in the named university are discussed.

Keywords: carbon nanomaterials; chemical vapour deposition; graphene; pyrolytic carbon; diamond-like carbon; Raman spectroscopy.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state scientific and technical programme for 2021–2025 «National standards and high-tech research equipment» (subprogramme «Scientific and educational equipment», assignments 57 and 67), state scientific research programme «Convergence-2025» (subprogramme «Interdisciplinary research and new emerging technologies», assignment 3.02.2) and state scientific research programme «Materials science, new materials and technologies» (subprogramme «Nanostructure», assignment 2.14.3). The authors express their gratitude to O. V. Korolik for measuring the Raman spectra of graphene samples and pyrolytic carbon films.

Введение

Последние десятилетия развития науки и технологий ознаменовались быстрым прогрессом в синтезе наноструктурированных сред, свойства которых существенно отличаются от свойств объемных материалов. Среди различных наноструктур хорошо известны углеродные наноматериалы, такие как графен [1; 2], фуллерен [3], углеродная нанотрубка [3; 4] – квазиодномерная макромолекула углерода, наноразмерная форма пиролитического углерода (PyC) [5; 6] и т. д. Сравнительно низкая стоимость и широкий спектр уникальных свойств углеродных наноматериалов являются стимулами для их активного исследования.

Графен представляет собой монослой графита, обладающий двумерной гексагональной кристаллической решеткой, которая образована расположенными в вершинах шестиугольников sp^2-гибридизированными атомами углерода. Для графена характерны высокая подвижность носителей заряда даже при комнатной температуре, механическая прочность, оптическая прозрачность и большая удельная поверхность, что позволяет рассматривать его в качестве материала для различных устройств электроники, фотоники, сенсорики, композитов и покрытий [7; 8]. В настоящее время на основе графена разрабатываются полевые транзисторы, жидкокристаллические дисплеи, светодиоды, сенсоры, суперконденсаторы и фотоэлементы для солнечных батарей, а также изучается возможность использования этого наноматериала для хранения водорода [2]. В отличие от графена пиролитическому углероду свойственна аморфная структура sp^2-гибридизированных атомов углерода. Он обладает высокой прочностью,

тепло- и электропроводностью, химической инертностью, износостойкостью и биосовместимостью, что позволяет использовать данный материал для создания электронных устройств (в качестве электродов), защитных электромагнитных покрытий [9], а также как покрытие для сердечных клапанов и других видов эндопротезов [5; 6; 10]. Долгое время практическое применение графена и подобных ему структур ограничивалось сложностью их получения в больших количествах. Однако бурное развитие методов синтеза этих материалов привело к существенному удешевлению данного процесса и, как результат, к расширению технологических возможностей использования графена и структур на его основе.

Одним из наиболее распространенных методов получения графена и графеноподобных материалов на поверхностях большой площади является химическое осаждение из газовой фазы (*chemical vapour deposition*, CVD). Этот подход развивался в Институте ядерных проблем БГУ (далее – НИИ ЯП), где был создан ряд установок CVD-синтеза графена и наноразмерных пленок пиролитического углерода [11; 12], а также лабораторная установка синтеза пиролитического углерода, обогащенного бором [13; 14]. Следует отметить вклад научных коллективов БГУ и сотрудников институтов, входящих в состав этого университета, в исследования физико-химических свойств графеноподобных наноматериалов и композитных материалов на их основе [15–19].

В настоящее время наряду с графеном и графеноподобными углеродными структурами активно исследуются наноматериалы из алмазоподобного углерода (*diamond-like carbon*, DLC) [20], которые, помимо sp^2-гибридизированных атомов, содержат в своей структуре атомы углерода в состоянии sp^3-гибридизации. Электрические, оптические и механические свойства подобных материалов зависят от относительного содержания в их составе sp^2- и sp^3-фракций, атомов водорода и металлов. Кроме того, алмазоподобные углеродные пленки ввиду алмазоподобной структуры характеризуются такими свойствами, как низкий коэффициент трения, высокая твердость и износостойкость, низкая электропроводность, оптическая прозрачность в ИК-диапазоне, химическая инертность и биосовместимость [20]. Подобные покрытия могут применяться для улучшения характеристик автомобильных и аэрокосмических деталей, защиты от износа режущих и формовочных инструментов, создания тонкопленочных сенсоров, плоских дисплеев, разнообразных биомедицинских компонентов, имплантов и т. д. [21; 22].

В свою очередь, значительный потенциал использования углеродных наноматериалов является стимулом для совершенствования технологий их синтеза. Одной из важных задач развития этого научного направления выступает подготовка специалистов, обладающих знаниями и навыками в области получения и исследования подобных наноструктур. Данная задача может решаться путем создания научно-образовательных комплексов по изучению графено- и алмазоподобных материалов. Такие комплексы предполагают проведение современных лабораторных практикумов для студентов учреждений высшего образования. Так, в рамках государственной научно-технической программы «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» сотрудники физического факультета БГУ и НИИ ЯП создали установку синтеза графеноподобных материалов и внедрили в образовательный процесс лабораторный практикум для студентов физического факультета указанного университета по синтезу и исследованию структурных и электрических свойств графена и пиролитического углерода[1].

В настоящей статье описан научно-учебный лабораторный комплекс для синтеза графеноподобных и наноуглеродных материалов CVD-методом, включая краткую характеристику основных элементов последнего, а также приведен перечень составленных лабораторных работ. Кроме того, рассмотрены подобранные режимы синтеза графена на медных и никелевых подложках и пленок пиролитического углерода на кварцевых подложках, представлены результаты исследования образцов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

Материалы и методы исследования

Для получения графеноподобных углеродных наноструктур в разработанном научно-учебном лабораторном комплексе используется один из наиболее популярных и производительных методов синтеза – CVD-метод. Он основан на термокаталитическом разложении углеродсодержащего газа внутри реакторной трубы при высоких температурах (около 1000 °C), а также на последующем осаждении углерода на поверхность подложки [23; 24]. В качестве источника углерода служит метан. При синтезе графена медная или никелевая фольга выступает в роли подложки и одновременно катализатора в процессе разложения метана.

Для реализации CVD-метода была разработана установка, получившая название INP-BSU CVD по составу коллектива участников и принципу действия, с возможностью контроля основных параметров синтеза. Общий вид установки в закрытом и открытом положении представлен на рис. 1. Данная установка включает в себя трубчатую CVD-печь VFT-1200-I (*Nobody Materials Science and Technology Co., Ltd.*,

[1] *Попова А.* Это материал будущего! Что изготавливают студенты в новой лаборатории физфака БГУ? [Электронный ресурс] // YouTube. URL: https://www.youtube.com/watch?v=K3KEyFB10U0 (дата обращения: 02.04.2025).

Китай), позволяющую производить быстрый нагрев до 1150 °С, кварцевую трубу, выполняющую роль реактора, в котором происходит синтез, источники необходимых газов, датчики давления и температуры, а также форвакуумный спиральный насос. Кроме того, установка INP-BSU CVD снабжена системой управления на основе персонального компьютера с возможностью дистанционного контроля посредством локальной сети или интернета. С помощью программного обеспечения процесс синтеза контролируется путем управления потоками газов и температурой нагрева реакторной трубы. Также программа позволяет устанавливать необходимые режимы работы печи, насоса, клапанов и осуществлять мониторинг показателей датчиков давления и температуры. Программное обеспечение комплекса было разработано специалистами НИИ ЯП и ООО «Вактайм» (Беларусь), его описание представлено в сопровождающей технической документации.

а/*a* *б*/*b*

Рис. 1. Общий вид установки INP-BSU CVD в закрытом (*а*) и открытом (*б*) положении
Fig. 1. General view of the INP-BSU CVD setup in closed (*a*) and open (*b*) position

Для установки INP-BSU CVD были разработаны технологические процессы синтеза графена на медной и никелевой фольге, а также пиролитического углерода на кварцевом стекле. Данные процессы осуществляются в пять этапов.

Этап 1: очистка системы подачи газов после предыдущих синтезов путем продувки системы газовой смесью из аргона, водорода и метана.

Этап 2: нагрев реакторной трубы до температуры приблизительно 1000–1100 °С.

Этап 3: подготовка поверхности подложек для синтеза путем их отжига при температуре 1000–1100 °С в атмосфере аргона и водорода при общем давлении 680 мбар (68 кПа) в течение 15 мин.

Этап 4: синтез графеноподобных пленок. Синтез графена на медной подложке осуществляется в потоке газовой смеси $CH_4 – H_2$ при давлении 1,5 мбар (150 Па) со скоростями потоков 100 см^3/мин для смеси аргона и водорода (в составе смеси 20 % водорода) и 50 см^3/мин для метана при температуре 1000 °С в течение 30 мин. Синтез графена на никелевой подложке, а также пиролитического углерода проходит в статической атмосфере метана и водорода при давлении метана 100 мбар (20 кПа) и 200 мбар (10 кПа) соответственно при температуре 1050–1100 °С в течение 30 мин.

Этап 5: охлаждение системы до комнатной температуры (около 21 °С). До достижения температуры 800 °С охлаждение образцов, синтезируемых на медных подложках, происходит в потоке аргона, водорода и метана, а после достижения указанной температуры – в статической атмосфере аргона и водорода. Охлаждение графена, синтезируемого на никелевой подложке, а также пиролитического углерода осуществляется только в атмосфере аргона и водорода.

Таким образом, технологические параметры на этапах 4 и 5 при синтезе графена на разных подложках и пленок пиролитического углерода отличаются между собой [25; 26]. Следует отметить, что в случае синтеза графена на никелевой фольге после осаждения атомов углерода на поверхность подложки происходит их диффузия в объем металла за счет высокой растворимости углерода в никеле. Затем при охлаждении растворимость углерода уменьшается, и последний выдавливается из объема подложки на ее поверхность. Таким образом происходит формирование графеновой пленки, толщина которой существенно зависит от количества углерода, диффундированного в объем никеля при высокой температуре, а также от скорости охлаждения. В случае синтеза графена на медной фольге, растворимость углерода в которой в 1000 раз меньше, чем в никелевой фольге, атомы углерода после осаждения на медь не диффундируют в объем подложки и, оставаясь на ее поверхности, формируют слой графена непосредственно при высокой температуре. В свою очередь, такая температура обусловливает уменьшение каталитической активности меди и, следовательно, торможение разложения метана.

Наряду с изготовлением научно-учебного лабораторного комплекса были разработаны методические указания к лабораторному практикуму для студентов старших курсов физического факультета БГУ, включающему лабораторные работы «CVD-синтез графена на медной подложке», «CVD-синтез графена на никелевой подложке», «CVD-синтез пленок пиролитического углерода», «Перенос пленок графена на диэлектрические подложки», «Анализ структуры пленок графена и пиролитического углерода методом комбинационного рассеяния света», «Измерение электрических свойств пленок графена и пиролитического углерода при различных значениях относительной влажности воздуха». При выполнении лабораторных работ студенты могут изучить принципы работы установки синтеза графена и пленок пиролитического углерода CVD-методом, ознакомиться со спецификой обслуживания оборудования для синтеза, получить навыки подготовки синтезированных пленок для дальнейшего описания их свойств, рассмотреть методики исследования структурных, оптических и электрических свойств синтезированных пленок.

В целях тестирования созданного оборудования и разработанных технологических процессов были получены образцы графена на медной и никелевой фольге, а также пленки пиролитического углерода на кварцевых подложках. Последующее изучение свойств синтезированного на медной или никелевой фольге графена осуществлялось с помощью образцов на подложках, используемых при синтезе. Кроме того, участники проекта адаптировали методику переноса графена на изолирующую подложку. Данный процесс включает в себя нанесение на графен поддерживающего слоя полимера полиметилметакрилата [27], растворенного в анизоле, методом центрифугирования. Удаление углерода с обратной стороны фольги осуществляется путем травления в кислородно-аргоновой плазме, травление медной подложки производится с применением хлорида железа ($FeCl_3$). После этого происходят перенос графена на диэлектрическую подложку и удаление слоя используемого полимера. В отличие от синтеза графена синтез пленок пиролитического углерода не требует задействования дополнительных катализаторов, что позволяет получать их на различных, в том числе диэлектрических, подложках (например, на кварцевом стекле) [28; 29]. Данное обстоятельство дает возможность изучать свойства пленок непосредственно после синтеза, без переноса пленки на другой носитель.

Результаты и их обсуждение

Анализ структуры образцов графена, синтезированных на медных и никелевых подложках, а также пленок пиролитического углерода проводился с помощью КРС-спектроскопии с использованием спектрально-аналитического комплекса на основе сканирующего конфокального микроскопа Nanofinder High End (СП «ЛОТИС ТИИ», Беларусь – Япония) с применением возбуждающего лазера с длиной волны 47 нм и мощностью 800 мкВт. Спектральное разрешение составляло около 3 $см^{-1}$, величина среднего размера пучка на поверхности образца равнялась приблизительно 0,75 мкм. Время накопления сигнала при измерениях соответствовало 30 с. Типичные спектры КРС синтезированного на медной и никелевой фольге графена, зарегистрированные в разных точках образцов, представлены на рис. 2 и 3. В спектрах КРС графена, синтезированного как на медной, так и на никелевой фольге, наблюдаются две характерные для его структуры линии: G-линия вблизи 1580 $см^{-1}$ и 2D-линия вблизи 2700 $см^{-1}$. Следует отметить практически полное отсутствие D-линии (вблизи 1350 $см^{-1}$) в представленных спектрах КРС обоих типов образцов, что свидетельствует о низкой концентрации точечных дефектов в измеренных областях графена.

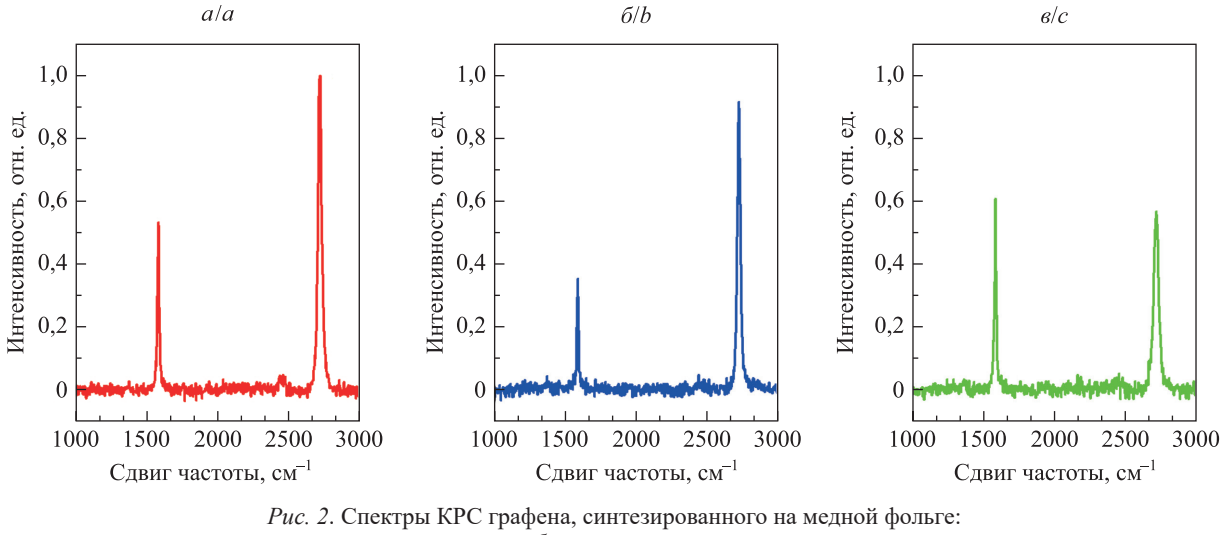

Рис. 2. Спектры КРС графена, синтезированного на медной фольге:
а – первая точка; *б* – вторая точка; *в* – третья точка

Fig. 2. Raman spectra of graphene synthesised on copper foil:
a – first point; *b* – second point; *c* – third point

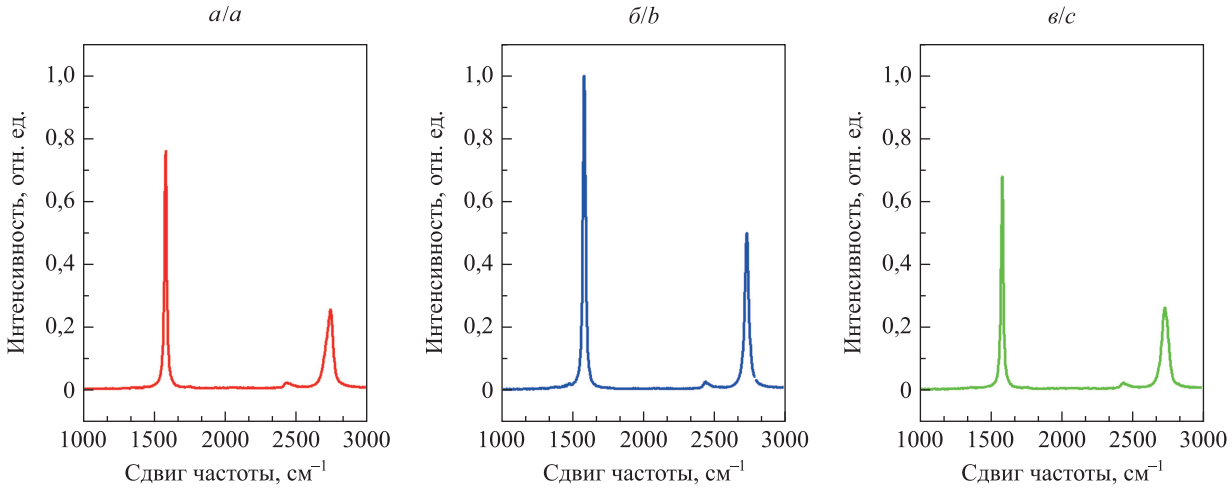

Рис. 3. Спектры КРС графена, синтезированного на никелевой фольге:
а – первая точка; *б* – вторая точка; *в* – третья точка

Fig. 3. Raman spectra of graphene synthesised on nickel foil:
a – first point; *b* – second point; *c* – third point

Соотношение между интенсивностями 2D- и G-пиков (I_{2D}/I_G) и значения полуширины линии 2D ($FWHM_{2D}$) позволяют оценить количество слоев графена в образцах [30; 31]. Было установлено, что в образцах на медной фольге преобладают области однослойного и двуслойного графена, в то время как в образцах на никелевой фольге присутствует только многослойный графен. Кроме того, в спектрах КРС синтезированного графена наблюдаются сдвиги пиков относительно их нормального положения в сторону меньших длин волн, что может быть обусловлено влиянием механических напряжений, возникающих в образцах из-за разницы в параметрах кристаллических решеток подложек и графена, а также разогревом используемого при измерениях лазера мощностью 800 мкВт [32]. С помощью значений сдвига по частоте G-пика ($\Delta\omega_G$) можно рассчитать величину напряжения сжатия (σ) по следующей формуле [33]:

$$\sigma = \frac{\Delta\omega_G}{\alpha} = \frac{\omega_\sigma - \omega_0}{\alpha},$$

где ω_σ – частота G-пика в образце графена; ω_0 – нормальное положение G-линии (1580 $см^{-1}$); α – деформационный коэффициент графита ($\alpha = 7{,}47\ см^{-1} \cdot ГПа^{-1}$). Структурные параметры двух образцов графена, полученные на основе спектров КРС, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Структурные параметры графена, синтезированного на медной фольге

Table 1

Structural parameters of graphene synthesised on copper foil

Точка образца	$\Delta\omega_G$, $см^{-1}$	$\Delta\omega_{2D}$, $см^{-1}$	I_{2D}/I_G	$FWHM_{2D}$, $см^{-1}$	σ, ГПа
Первая точка	2,68	25,01	1,87	30,10	0,36
Вторая точка	8,58	25,01	2,60	25,20	1,15
Третья точка	5,63	19,80	0,93	39,57	0,75

Таблица 2

Структурные параметры графена, синтезированного на никелевой фольге

Table 2

Structural parameters of graphene synthesised on nickel foil

Точка образца	$\Delta\omega_G$, $см^{-1}$	$\Delta\omega_{2D}$, $см^{-1}$	I_{2D}/I_G	$FWHM_{2D}$, $см^{-1}$	σ, ГПа
Первая точка	2,68	43,24	0,34	60,22	0,36
Вторая точка	2,68	32,83	0,50	32,08	0,36
Третья точка	2,68	32,83	0,39	57,43	0,36

На рис. 4 представлены типичные спектры КРС пленки пиролитического углерода, синтезированной на кварцевой подложке. Как известно, в отличие от спектров КРС графена спектры КРС пиролитического углерода характеризуются практически полным отсутствием 2D-линии, более широкими D- и G-линиями и наличием «долины» между ними [28]. Такие особенности наблюдались на спектрах КРС синтезированных нами пленок пиролитического углерода. По воспроизводимости спектров КРС, снятых в разных точках, можно сделать вывод об однородности образцов.

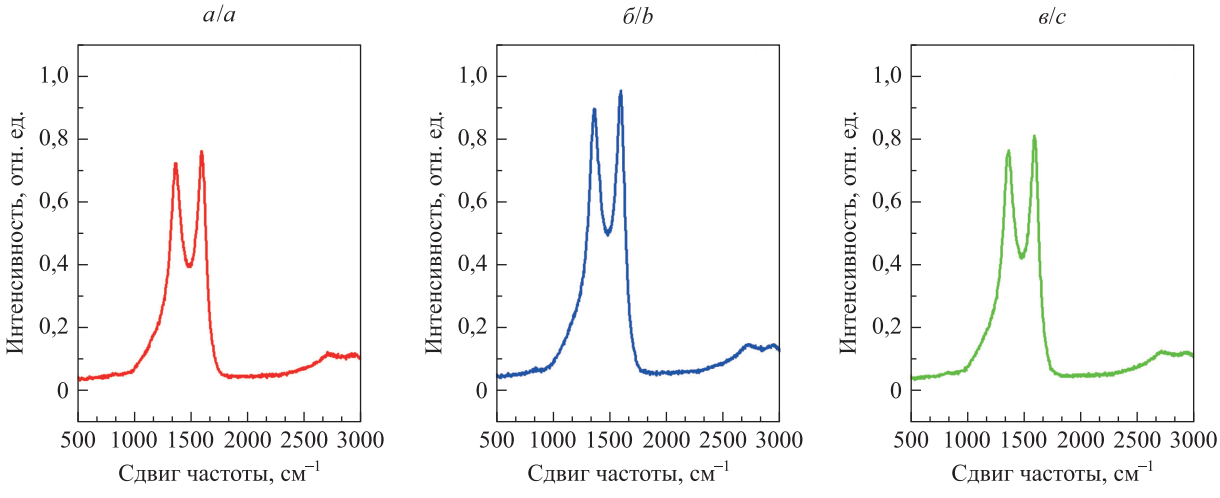

Рис. 4. Спектры КРС пленки пиролитического углерода, синтезированной на кварцевой подложке:
а – первая точка; *б* – вторая точка; *в* – третья точка

Fig. 4. Raman spectra of pyrolytic carbon film synthesised on quartz substrate:
a – first point; *b* – second point; *c* – third point

Наряду с внедрением научно-учебного лабораторного комплекса в образовательный процесс физического факультета БГУ важной задачей является его использование для научных исследований фундаментального и прикладного характера. Для этого оптимизируется и совершенствуется получение графена и пиролитического углерода с необходимыми структурными свойствами. В частности, отрабатываются методики улучшения предварительной подготовки и отжига используемых подложек, а также технологические режимы синтеза самих пленок. Дополнительная химическая обработка поверхности металлической фольги перед технологическим процессом, оптимизация параметров отжига подложек и синтеза графена позволят увеличить размеры зерен в структуре медной и никелевой фольги, изменить морфологию их поверхности, синтезировать графен с преобладанием необходимого количества слоев и минимальной концентрацией точечных дефектов в них. Дальнейшая отработка технологических режимов синтеза пленок пиролитического углерода даст возможность улучшить воспроизводимость их структурных и электрических свойств.

Одним из перспективных направлений исследований графена является модификация его свойств путем легирования атомами различных элементов (например, азота и бора), которые замещают атомы углерода в кристаллической решетке. Использование приведенных в пример элементов обусловлено близостью размеров их атомов к размеру атома углерода. Встраивание атомов азота и бора в графен вызывает изменение в зонной структуре последнего: «открывается» запрещенная зона, и материал преобразуется в полупроводник *n*- или *p*-типа [34; 35]. Такой графен может использоваться в качестве материала для создания полевых транзисторов, литий-ионных батарей, суперконденсаторов, газовых сенсоров, био- и электрохимических сенсоров, устройств хранения водорода и других устройств фотоники, электроники, фотовольтаики и сенсорики [36; 37]. В настоящее время сотрудники НИИ ЯП получили предварительные результаты по разработке метода легирования азотом графена, синтезированного с применением научно-учебного лабораторного комплекса. Обнаружено, что в спектре КРС графена, легированного азотом, при длине волны возбуждающего лазера 488 нм наблюдаются характерные для графена моды и выраженные дефектные (D и D′) моды. Возникновение D-моды обусловлено появлением дефектов в структуре графена, тогда как присутствие D′-моды указывает на замещение атомов углерода азотом в решетке графена [38].

Кроме того, перспективным направлением для изучения синтезированных нами графена и пленок пиролитического углерода выступает рассмотрение их взаимодействия с электромагнитным излучением терагерцевого диапазона, которое широко используется в различных областях науки и техники: медицине, биологии, спектроскопии, телекоммуникациях, метрологии, системах безопасности,

оптоэлектронике и фотонике [8; 9; 39; 40]. Исследования, проведенные в НИИ ЯП, показали, что на основе графена могут быть созданы полевые транзисторы, работающие в терагерцевом диапазоне частот [41; 42]. На базе измерений спектров пропускания графеновой метаповерхностью терагерцевого излучения было предложено использовать графен в качестве экранирующего материала [43; 44]. Так, в работе [43] было продемонстрировано, что метаповерхность на основе графена способна обеспечить практически 100 % поглощение электромагнитного излучения терагерцевого диапазона частот. Также показана возможность использования пленок пиролитического углерода, полученных путем CVD-синтеза, в качестве прозрачных электродов в жидкокристаллических ячейках, которые предназначены для управления терагерцевым излучением [44].

Следует отметить, что в настоящее время на стадии разработки находится научно-учебный лабораторный комплекс по получению и изучению электрических и механических свойств алмазоподобных углеродных пленок. Планируемый срок окончания работ – конец 2025 г. Синтез алмазоподобных углеродных пленок будет осуществляться методом микроволнового плазмохимического осаждения из газовой фазы, или методом стимулированного или усиленного плазмой химического осаждения из газовой фазы (*plasma enhanced chemical vapour deposition*, PECVD). Название данной разновидности способа получения наноструктур связано с тем, что при синтезе углеродные наноструктуры наряду с нагревом подложки подвергаются воздействию сверхвысокочастотной плазмы. В процессе синтеза сверхвысокочастотное излучение способствует ионизации газов в реакционной камере, что приводит к преобразованию газовой среды в химически активные возбужденные состояния, взаимодействующие с подложкой. Такая технология позволяет управлять структурой синтезируемого наноматериала и получать пленки с преобладанием sp^3-гибридизированных фракций углерода, характерных для структуры алмаза. Достоинствами PECVD-синтеза являются протекание процесса при более низкой температуре по сравнению с температурой при использовании метода термокаталитического осаждения, высокая адгезия и однородность получаемых материалов, возможность синтеза пленок на поверхностях больших площадей. Планируется, что разработанная установка позволит получать алмазоподобные углеродные пленки толщиной 0,2–5,0 мкм с содержанием sp^3-фракции не менее 50 %. Также будет создан лабораторный практикум для студентов физического факультета БГУ для изучения ими методики синтеза алмазоподобных углеродных пленок посредством PECVD-синтеза, а также электрических и механических свойств данных пленок.

Два названных выше научно-учебных лабораторных комплекса не только обеспечивают совершенствование научного и образовательного процессов в БГУ в области наноматериалов и нанотехнологий, но и являются основой для следующего шага – создания на физическом факультете БГУ при активном участии сотрудников НИИ ЯП Центра исследований углеродных наноструктур, в котором могли бы проходить стажировку и проводить научные исследования как магистранты и аспиранты ведущего университета Беларуси, так и учащиеся других учреждений высшего образования страны.

Заключение

Сотрудники физического факультета БГУ и НИИ ЯП создали научно-учебный лабораторный комплекс для синтеза графеноподобных и наноуглеродных материалов с применением CVD-метода, оптимизировали технологические режимы синтеза графена и пленок пиролитического углерода, а также внедрили в образовательный процесс физического факультета БГУ лабораторный практикум для студентов, обучающихся по специальности «наноматериалы и нанотехнологии». На основе результатов анализа спектров КРС образцов, синтезированных с использованием научно-учебного лабораторного комплекса, продемонстрирована возможность получения пленок однослойного и многослойного графена и пиролитического углерода.

В настоящее время сотрудники названных выше учреждений разрабатывают научно-учебный лабораторный комплекс для синтеза алмазоподобных углеродных пленок с помощью PECVD-метода. Данный комплекс планируется установить на физическом факультете БГУ и внедрить в образовательный процесс кафедры физики полупроводников и наноэлектроники и кафедры физики твердого тела и нанотехнологий, что позволит студентам изучать синтез алмазоподобных углеродных пленок, а также методики исследования их электрических и механических свойств.

Подобные комплексы могут использоваться при реализации образовательного процесса в других университетах Беларуси для подготовки специалистов физических и инженерных специальностей на 1-й и 2-й ступенях высшего образования, кадров высшей квалификации, а также при проведении в учреждениях высшего образования и институтах НАН Беларуси научных исследований, направленных на разработку элементов фотоники, электроники, сенсорики на основе графено- и алмазоподобных пленок. Описанные в настоящей статье научно-учебные лабораторные комплексы должны войти в состав

Центра исследований углеродных наноструктур, который планируется создать на базе БГУ. Использование данных комплексов позволит существенно укрепить материально-техническую базу университетов и повысить уровень подготовки кадров, востребованных на современных наукоемких производствах, таких как ОАО «Планар», ОАО «Интеграл» и др.

Библиографические ссылки

1. Елецкий АВ, Искандарова ИМ, Книжник АА, Красиков ДН. Графен: методы получения и теплофизические свойства. *Успехи физических наук*. 2011;181(3):233–268. DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103a.0233.

2. Грайфер ЕД, Макотченко ВГ, Назаров АС, Ким СДж, Федоров ВЕ. Графен: химические подходы к синтезу и модифицированию. *Успехи химии*. 2011;80(8):784–804. DOI: 10.1070/RC2011v080n08ABEH004181.

3. Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Eklund PC. Science of fullerenes and carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*. 1996;118(37):8987. DOI: 10.1021/ja9655931.

4. Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Avouris Ph, editors. *Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications*. Heidelberg: Springer; 2003. 449 p. (Topics in applied physics; volume 80). DOI: 10.1007/3-540-39947-X.

5. Bokros JC. Deposition, structure and properties of pyrolytic carbon. In: Walker PL, editor. *Chemistry and physics of carbon. Volume 4*. New York: Marcel Dekker Inc.; 1969. p. 1–118.

6. McEvoy N, Peltekis N, Kumar Sh, Rezvani E, Nolan H, Keeley GP, et al. Synthesis and analysis of thin conducting pyrolytic carbon films. *Carbon*. 2012;50(3):1216–1226. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.10.036.

7. Maffucci A, Maksimenko S, Svirko Yu, editors. *Carbon-based nanoelectromagnetics*. Amsterdam: Elsevier; 2019. 258 p. (Nanophotonics).

8. Шашкова ЕГ, Волынец НИ, Демиденко МИ, Поддубская ОГ. Электромагнитные свойства пористых 3D-структур на основе углерода в высокочастотном диапазоне. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2021;64(6):76–83. DOI: 10.17223/00213411/64/6/68.

9. Максименко СА, Кулагова ТА, Окотруб АВ, Сусляев ВИ. Актуальные задачи использования композиционных и гибридных материалов на основе различных форм углерода в электромагнитных и биомедицинских приложениях. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2023;1:55–69.

10. More RB, Haubold AD, Bokros JC. Pyrolytic carbon for long-term medical implants. In: Ratner BD, Hoffman AS, Schoen FJ, Lemons JE. *Biomaterials science*. Amsterdam: Academic Press; 2013. p. 209–222. DOI: 10.1016/B978-0-08-087780-8.00023-1.

11. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Paddubskaya A, Voronovich S, Kaplas T, et al. Enhanced microwave shielding effectiveness of ultrathin pyrolytic carbon films. *Applied Physics Letters*. 2013;103:073117. DOI: 10.1063/1.48186802013.

12. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Paddubskaya A, Voronovich S, Lambin Ph, et al. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption. *Scientific Reports*. 2014;4(1):7191. DOI: 10.1038/srep07191.

13. Демиденко МИ, Адамчук ДВ, Русанов АП, Сироткин СВ, Иванько ЛВ, Максименко СА. Легированный бором пиролитический углерод: материал для биомедицинского и инженерно-технического применения. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2023;67(3):250–256. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-3-250-256.

14. Demidenko M, Adamchuk Dz, Liubimau A, Uglov V, Ishchenko A, Chekan M, et al. High temperature synthesis and material properties of boron-enriched balk pyrolytic carbon. *Materials Science and Engineering B.* 2024;307:117491. DOI: 10.1016/j.mseb.2024.117491.

15. Федотов АК, Харченко АА, Гуменник ВЭ, Федотова ЮА, Чичков МВ, Малинкович ВД и др. Влияние синтеза и подложки на электросопротивление в однослойном графене. В: Оджаев ВБ, редактор. *Материалы и структуры современной электроники. Материалы IX Международной научной конференции; 14–16 октября 2020 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2020. с. 420–424. EDN: UVCYTQ.

16. Колесов ЕА, Тиванов МС, Королик ОВ, Свито ИА, Антонович АС, Капитанова ОО, et al. Влияние отжига на фононные и электронные свойства графена на SiO_2/Si и Al_2O_3. В: Оджаев ВБ, редактор. *Материалы и структуры современной электроники. Материалы X Международной научной конференции; 12–14 октября 2022 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2022. с. 423–430.

17. Тиванов МС, Колесов ЕА, Королик ОВ, Саад АМ, Ковальчук НГ, Комиссаров ИВ и др. Спектры комбинационного рассеяния света графена, синтезированного методом химического осаждения из газовой фазы с использованием декана. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2017;84(6):898–904. EDN: ZTSSOZ.

18. Kuzhir PP, Poddubskaya OG, Bychenok DS, Pliyushch A, Nemilentsau A, Shuba MV, et al. CNT based epoxy resin composites for conductive applications. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. 2011;3(6):889–894. DOI: 10.1166/nnl.2011.1252.

19. Seliuta D, Kašalynas I, Macutkevic J, Valušis G, Shuba MV, Kuzhir PP, et al. Terahertz sensing with carbon nanotube layers coated on silica fibers: carrier transport versus nanoantenna effects. *Applied Physics Letters.* 2010;97(7):073116. DOI: 10.1063/1.3478009.

20. Grill A. Diamond-like carbon: state of the art. *Diamond and Related Materials*. 1999;8:428–434. DOI: 10.1016/S0925-9635(98)00262-3.

21. Боровиков СМ, Пигаль РВ, Терещук ОИ. Свойства и применение DLC-покрытий. *Молодой ученый*. 2021;6:6–9. EDN: IKXSNR.

22. Седельникова ОВ, Городецкий ДВ, Федоренко АД, Баскакова КИ, Поддубская ОГ, Королик ОВ и др. Влияние sp^2-гибридизированных углеродных включений в алмазной пленке на сенсорные свойства по отношению к синхротронному излучению. *Журнал структурной химии*. 2024;65(9):132222. DOI: 10.26902/jsc_id132222.

23. Dhingra Sh, Hsu JF, Vlassiouk I, D'Urso B. Chemical vapor deposition of graphene on large-domain ultra-flat copper. *Carbon*. 2014;69:188–193. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.12.014.

24. Смовж ДВ, Костогруд ИА, Бойко ЕВ, Маточкин ПЕ, Безруков ИА, Кривенко АС. Синтез графена методом химического осаждения из газовой фазы и его перенос на полимер. *Прикладная механика и техническая физика*. 2020;61(5):235–245. DOI: 10.15372/PMTF20200524.

25. Losurdo M, Giangregorio MM, Capezzuto P, Bruno G. Graphene CVD growth on copper and nickel: role of hydrogen in kinetics and structure. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011;13(46):20836–20843. DOI: 10.1039/c1cp22347j.

26. Wang Q, Wei L, Sullivan M, Yangb SW, Chen Yu. Graphene layers on Cu and Ni(111) surfaces in layer controlled graphene growth. *RSC Advances*. 2013;3(9):3046–3053. DOI: 10.1039/c2ra23105k.

27. Her M, Beams R, Novotny L. Graphene transfer with reduced residue. *Physics Letters A*. 2013;377(21–22):1455–1458. DOI: 10.1016/j.physleta.2013.04.015.

28. Kaplas T, Svirko YuP. Direct deposition of semitransparent conducting pyrolytic carbon films. *Journal of Nanophotonics*. 2012; 6(1):061703. DOI: 10.1117/1.jnp.6.061703.

29. Kaplas T, Svirko Y, Kuzhir P. Synthesis of pyrolytic carbon films on dielectric substrates. In: Maffucci A, Maksimenko SA, editors. *Fundamental and applied nano-electromagnetics.* Dordrecht: Springer; 2016. p. 227–238. (NATO science for peace and security. Series B, Physics and biophysics). DOI: 10.1007/978-94-017-7478-9_12.

30. Malard LM, Pimenta MA, Dresselhaus G, Dresselhaus MS. Raman spectroscopy in graphene. *Physics Reports*. 2009;473(5–6): 51–87. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.02.003.

31. Li Zh, Deng L, Kinloch IAA, Young RJ. Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: graphene, nanotubes and fibres. *Progress in Materials Science*. 2023;135:101089. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101089.

32. Nanda SS, Kim MJ, Yeom KS, An SSA, Ju H, Yi DK. Raman spectrum of graphene with its versatile future perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2016;80:125–131. DOI: 10.1016/j.trac.2016.02.024.

33. Конакова РВ, Коломыс АФ, Охрименко ОБ, Стрельчук ВВ, Волков ЕЮ, Григорьев МН и др. Сравнительные характеристики спектров комбинационного рассеяния света пленок графена на проводящих и полуизолирующих подложках 6*H*-SiC. *Физика и техника полупроводников*. 2013;47(6):802–804.

34. Zhao L, He R, Rim KT, Schiros Th, Kim KS, Zhou H, et al. Visualizing individual nitrogen dopants in monolayer graphene. *Science*. 2011;333:999–1003. DOI: 10.1126/science.1208759.

35. Lherbier A, Blase X, Niquet YaM, Triozon F, Roche S. Charge transport in chemically doped 2D graphene. *Physical Review Letters*. 2008;101:036808. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.036808.

36. Wang H, Maiyalagan T, Wang X. Review on recent progress in nitrogen-doped graphene: synthesis, characterization, and its potential applications. *ACS Catalysis*. 2012;2(5):781–794. DOI: 10.1021/cs200652y.

37. Agnoli S, Favaro M. Doping graphene with boron: a review of synthesis methods, physicochemical characterization, and emerging applications. *Journal of Materials Chemistry A.* 2016;4(14):5002–5025. DOI: 10.1039/C5TA10599D.

38. Luo Zh, Lim S, Tian Zh, Shang J, Lai L, MacDonald B, et al. Pyridinic N doped graphene: synthesis, electronic structure, and electrocatalytic property. *Journal of Materials Chemistry*. 2011;21(22):8038–8044. DOI: 10.1039/c1jm10845j.

39. Макеева ГС, Голованов ОА, Вареница ВВ, Артамонов ДВ. Математическое моделирование прохождения терагерцевого излучения через монослой графена. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2014;3:145–158. EDN: RBYEKA.

40. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Volynets N, Voronovich S, Paddubskaya A, et al. Enhanced microwave-to-terahertz absorption in graphene. *Applied Physics Letters*. 2016;108(12):123101. DOI: 10.1063/1.4944531.

41. Maffucci A, Maksimenko SA, editors. *Fundamental and applied nano-electromagnetics II: THz circuits, materials, devices.* Dordrecht: Springer; 2019. 290 p. (NATO science for peace and security. Series B, Physics and biophysics). DOI: 10.1007/978-94-024-1687-9.

42. Baah M, Paddubskaya A, Novitsky A, Valynets N, Kumar M, Itkonen T, et al. All-graphene perfect broadband THz absorber. *Carbon*. 2021;185:709–716. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.09.067.

43. Lamberti P, La Mura M, Tucci V, Nkyalu E, Khan A, Yakovleva M, et al. The performance of graphene-enhanced THz grating: impact of the gold layer imperfectness. *Materials*. 2022;15(3):786. DOI: 10.3390/ma15030786.

44. Batrakov KG, Valynets NI, Dubinetski MM, Paddubskaya AG, Margaryan HL, Hakobyan NH, et al. Fabry-Perot enhancement of liquid crystals birefringence effects in terahertz range. *Physica Scripta*. 2024;100(1):0155120. DOI: 10.1088/1402-4896/ad96e8.

Получена 08.04.2025 / исправлена 09.04.2025 / принята 14.04.2025.
Received 08.04.2025 / revised 09.04.2025 / accepted 14.04.2025.

Авторы:

Игорь Николаевич Громов – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физики электронных материалов кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета[1)], младший научный сотрудник лаборатории наноэлектромагнетизма[2)].

Марина Ивановна Демиденко – заведующий лабораторией наноэлектромагнетизма.

Виталий Казимирович Ксеневич – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией физики электронных материалов кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.

Authors:

Igor N. Gromov, junior researcher at the research laboratory of physics of electronic materials, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics[a], and junior researcher at the laboratory of nanoelectromagnetics[b].
gromov-igor.post@yandex.by
https://orcid.org/0009-0007-8395-5572

Marina I. Demidenko, head of the laboratory of nanoelectromagnetics.
demidenko@inp.bsu.by
https://orcid.org/0009-0001-3285-4495

Vitaly K. Ksenevich, PhD (physics and mathematics), docent; head of the research laboratory of physics of electronic materials, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
ksenevich@bsu.by
https://orcid.org/0000-0003-3253-4659

Мария Анатольевна Самарина – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физики электронных материалов кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.
Надежда Игоревна Волынец – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории наноэлектромагнетизма.
Сергей Афанасьевич Максименко – доктор физико-математических наук, профессор; директор.

Maria A. Samarina, junior researcher at the research laboratory of physics of electronic materials, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
samarinama@bsu.by
https://orcid.org/0009-0008-0461-8365
Nadzeya I. Valynets, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the laboratory of nanoelectromagnetics.
nadezhda.volynets@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-6371-9408
Sergey A. Maksimenko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; director.
sergeymaksimenko@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8271-0449