

Оригинальная статья / Original article

УДК 537.9:535.3:548.75:543.424.2

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-105-116>

Оптические свойства и зонная структура ленгмюровских пленок нитрида бора

И. В. Локтионова¹ ✉, А. П. Кузьменко¹, А. И. Жакин¹, В. М. Емельянов¹,
А. С. Сизов^{1,2}, П. В. Абакумов³, А. В. Рышкова³, Ю. А. Неручев²,
В. В. Филиппов⁴

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Курский государственный университет,
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

³ Курский государственный медицинский университет
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

⁴ Липецкий государственный педагогический университет им. П. П. Семенова-Тян-Шанского
ул. Ленина, д. 42, г. Липецк 398020, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Резюме

Цель. Исследовать структурные особенности пленок нитрида бора, полученных методом Ленгмюра – Блоджетт и определить их зонную структуру по спектрам флуоресценции и поглощения.

Методы. Осаждение ленгмюровских пленок производилось на установке KSV NIMA 2002 из коллоидного раствора ST BN/CHCl₃. Изучение оптических свойств производилось на спектрфотометре СФ 2000 в спектральном диапазоне 200–1100 нм и конфокальном рамановском микроспектретре OmegaScope Aist-NT со спектральным разрешением 3 см⁻¹. Изучение морфологии поверхности проводилось с помощью сканирующего зондового микроскопа SmartSPM AIST-NT со стандартными кремниевыми кантилеверами NSA10 с радиусом острия иглы 7 нм. Моделирование зонной структуры стабилизированных наночастиц нитрида бора было произведено в программном пакете MaterialsStudio 2020 с модулем CASTEP.

Результаты. Изучены спектральные особенности осажденных пленочных структур из стабилизированных наночастиц гексагонального нитрида бора. Оптическими методами определен гидродинамический размер наночастиц ~100 нм и латеральный размер наночастиц в ленгмюровских пленках 84,6 нм, рассчитанный по полуширине спектрального пика 1360 см⁻¹ с симметрией E_{2g}, и 82,4 нм – по данным сканирующей зондовой микроскопии. Получены спектры поглощения и флуоресценции коллоидных частиц с аномально большим Stokes-овым сдвигом 105 нм и квантовым выходом 0,72. Методом Тауца и ab-initio моделированием определена ширина запрещенной зоны стабилизированных наночастиц 5,79 и 5,46 эВ соответственно.

Заключение. В работе изучены морфология поверхности, оптические свойства и зонная структура осажденных ленгмюровских пленок из стабилизированных наночастиц нитрида бора.

Ключевые слова: метод Ленгмюра – Блоджетт; гексагональный нитрид бора; пленки; флуоресценция; сканирующая зондовая микроскопия; спектрфотометрия.

Финансирование: Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Локтионова И. В., Кузьменко А. П., Жакин А. И., Емельянов В. М., Сизов А. С., Абакумов П. В., Рышкова А. В., Неручев Ю. А., Филиппов В. В., 2023

Для цитирования: Оптические свойства и зонная структура лэнгмюровских пленок нитрида бора / И. В. Локтионова, А. П. Кузьменко, А. И. Жакин, В. М. Емельянов, А. С. Сизов, П. В. Абакумов, А. В. Рышкова, Ю. А. Неручев, В. В. Филиппов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 105–116. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-105-116>

Поступила в редакцию 10.07.2023

Подписана в печать 21.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Optical Properties and Band Structure of Boron Nitride Langmuir Films

Inna V. Loktionova¹ ✉, Alexander P. Kuzmenko¹, Anatoly I. Zhakin¹,
Viktor M. Yemelyanov¹, Alexander S. Sizov^{1,2}, Pavel V. Abakumov²,
Anna V. Ryshkova², Anatoly Yu. Neruchev³, Vladimir V. Filippov⁴

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

³ Kursk State Medical University
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

⁴ Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky
42 Lenina Str., Lipetsk 398020, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Abstract

Purpose. Investigate the structural features of boron nitride films obtained by the Langmuir-Blodgett method. Observe fluorescence spectra and determine the band structure of the resulting coatings using optical methods.

Methods. The deposition of Langmuir films was carried out using the KSV NIMA 2002 setup from the colloidal solution of ST BN/CHCl₃. The study of optical properties was conducted using the SF 2000 spectrophotometer in spectral range 200 – 1100 nm and the confocal Raman microspectrometer OmegaScope AIST-NT with spectral resolution 3 cm⁻¹. Surface morphology investigation was performed using the scanning probe microscope SmartSPM AIST-NT with standard silicon cantilevers NSA10, tip radius 7 nm. The band structure modeling of stabilized boron nitride nanoparticles was carried out using the MaterialsStudio 2020 software package with the CASTEP module.

Results. The spectral characteristics of deposited film structures made of stabilized hexagonal boron nitride nanoparticles have been investigated. The hydrodynamic size of the nanoparticles was determined to be ~100 nm using optical methods, while the lateral size of the nanoparticles in Langmuir films was found to be 84.6 nm, calculated from the spectral peak at 1360 cm⁻¹ with E_{2g} symmetry, and 82.4 nm based on scanning probe microscopy data. Absorption and fluorescence spectra of colloidal particles were obtained, showing an unusually large Stokes shift of 105 nm and a quantum yield of 0.72. The bandgap width of the stabilized nanoparticles was measured using the Tautz method and ab-initio modeling, resulting in values of 5.79 eV and 5.46 eV, respectively.

Conclusion. The study examines the surface morphology, optical properties, and band structure of the deposited Langmuir films made of stabilized boron nitride nanoparticles.

Keywords: Langmuir-Blodgett method; hexagonal boron nitride; films; fluorescence; scanning probe microscopy; spectrophotometry.

Financing: The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Loktionova I. V., Kuzmenko A. P., Zhakin A. I., Emelaynov V. M., Sizov S. A., Abakumov P. V., Ryshkova A. V., Neruchev A. Yu., Filippov V. V.: Optical Properties and Band Structure of Boron Nitride Langmuir Films. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(3): 105–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-105-116>

Received 10.07.2023

Accepted 21.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Нитрид бора, благодаря широкому диапазону своих оптических свойств, является уникальным материалом для оптоэлектроники. Его гексагональная модификация изоструктурна к графену, термически и химически стабильна [1–13]. Борнитридные соединения могут быть синтезированы в виде нанотрубок, квантовых точек и нанопленок. Исследования зонной структуры гексагонального нитрида бора и его флуоресцентных процессов отражают необходимость в глубоком понимании его фундаментальных электронных и оптических свойств. В зависимости от методов синтеза и структурных дефектов свойства и основные параметры материалов из нитрида бора варьируются. В работе [14] синтезированы гидротермальным методом из борной кислоты и гидроксида аммония фотостабильные квантовые точки нитрида бора, которые при возбуждении на длине волны 305 нм флуоресцируют в синей области оптического спектра с максимумом 400 нм и квантовым выходом 32%. Квантовые точки, приготовленные на водной основе синтезом гидроксил- и аминифункционализированных групп нитрида бора, демонстрируют квантовый выход до 18,3% [15]. Обработка ультразвуком коммерческого порошка нитрида бора в смеси воды, этанола и ацетона с последующей гидротермической обработкой в автоклаве при 180°C позволило синтезировать однородные квантовые точки с размером 1,65 нм и квантовым выходом флуоресценции 2,49% [16]. Кроме того, свежеприготовленные точки

демонстрируют сильную флуоресценцию в УФ-видимом диапазоне (365 нм) облучение и затухание наносекундной люминесценции. Эпитаксиально выращенные пленки CVD методом в [3] находятся под напряжением, о чем свидетельствует смещение пика колебательной моды $E_{2g} = 1368 \text{ см}^{-1}$ в сторону более высоких частот фононов по сравнению с объемным пиком комбинационного рассеяния нитрида бора (1366 см^{-1}). Тонкие пленки в [17], полученные этим же методом, демонстрируют высокий квантовый выход $87 \pm 7\%$ на длине волны 580 нм.

Тем не менее фундаментальные закономерности и спектральные характеристики процессов поглощения и излучения лэнгмюровских пленок изучены недостаточно. Такая информация позволит определить микропараметры и возможную структуру энергетических уровней в запрещенной зоне, которые обусловлены дефектами различной природы для расширения знаний о его свойствах и перспективных возможностях применения нитрида бора.

Материалы и методы

Пленки гексагонального нитрида бора осаждались методом Ленгмюра – Блоджетт на установке KSV NIMA 2002 из коллоидного раствора нитрида бора, стабилизированного стеариновой кислотой ST BN/ CHCl_3 , предварительно растворенной в хлороформе. Спектры комбинационного рассеяния света и флуоресценции (ФЛ) осаждаемых пленок измерялись с помощью сканирующего конфокального

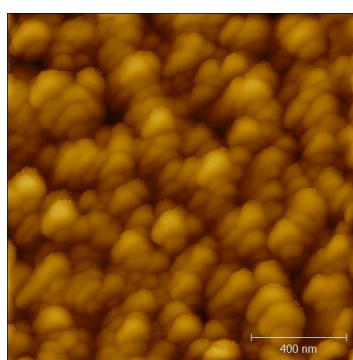
микроспектрометра OmegaScope AIST-NT (лазерное излучение $\lambda = 473, 532, 785$ нм, 25, 50, 80 мВт соответственно) в ZXXZ геометрии.

Морфология поверхности пленок исследовалась на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) SmatrSPM AIST-NT в полуконтактном режиме со стандартным кремниевым зондом. Спектр поглощения коллоидной системы ST BN/ CHCl_3 измерялся с помощью спектрофотометра СФ2000. Моделирование зонной струк-

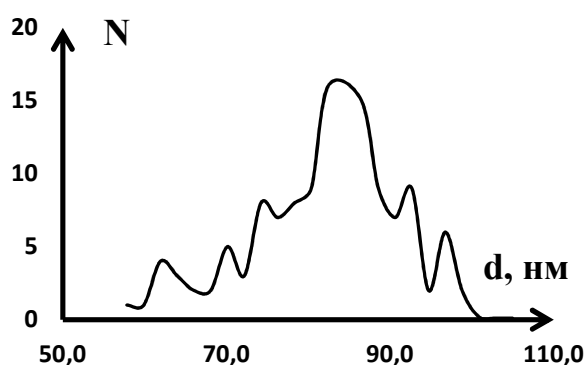
туры и показателя преломления стабилизированных наночастиц гексагонального нитрида бора производилось в программном пакете Materials Studio 2020 с модулем CASTEP.

Результаты и их обсуждение

На СЗМ-изображении (рис. 1, а) представлена поверхность пленки ST BN с регулярной структурой и средним размером частиц 82,4 нм по данным гранулометрического анализа (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. АСМ-изображение лэнгмюровской пленки стабилизированного нитрида бора (а) и гранулометрический анализ пленки (б)

Fig. 1. AFM image of the Langmuir film of stabilized boron nitride (а) и granulometric analysis of the film (б)

Спектр комбинационного рассеяния света тонких пленок стабилизированного нитрида бора (ST BN) содержит спектральную линию 1360 см^{-1} , которая соответствует дважды вырожденным оптическим латеральным колебаниям с симметрией E_{2g} (рис. 2). При этом атомы азота и бора совершают колебания в противофазе. Кристаллическая структура гексагонального нитрида бора, а именно плоскостное, графитоподобное расположение атомов обуславливает отсутствие ТО-ЛО расщепления оптических фононов.

Анализ спектра показал, что линия E_{2g} незначительно смещена влево (1360 см^{-1}) относительно ее значения для объемного кристалла гексагонального нитрида бора (1366 см^{-1}), что связано с уменьшением размеров кристаллов до

наноуровня и образованием химической связи между нитридом бора и молекулами стеариновой кислоты, а также деформацией приповерхностных слоев нитрида бора.

Согласно эмпирической формуле для гексагонального нитрида бора

$$L = \frac{141.7}{\text{FWHM}-8.7},$$

где L – размер наночастицы, нм; FWHM – полная ширина пика на половине максимума его интенсивности (см. рис. 2, вставка), размер наночастиц ST BN составляет 84,6 нм, что согласуется с данными СЗМ (см. рис. 1, б).

На рисунке 3 представлен фрагмент спектра поглощения коллоидных частиц ST BN/ CHCl_3 в диапазоне 400–1000 нм.

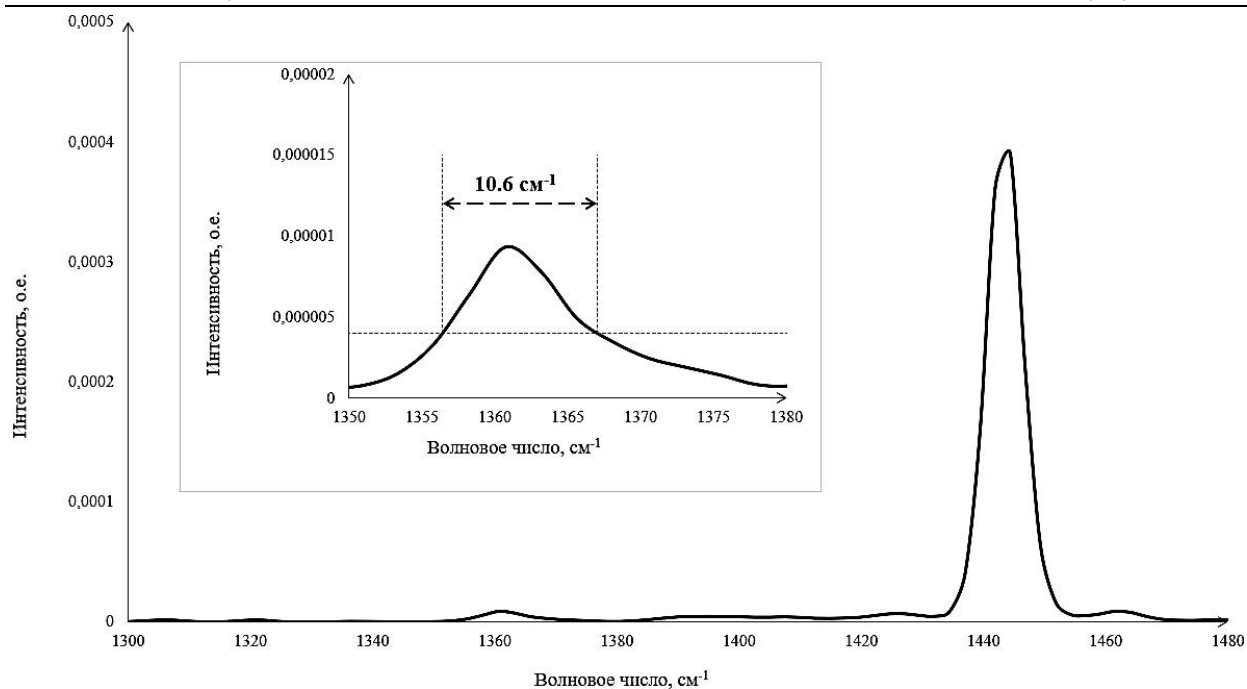


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света покрытия из стабилизированных наночастиц ST BN/ CHCl_3 , на вставке – полуширина линии 1360 cm^{-1}

Fig. 2. Raman scattering spectrum of a coating made of stabilized h-BN nanoparticles, on the insert – the half-width of the line 1360 cm^{-1}

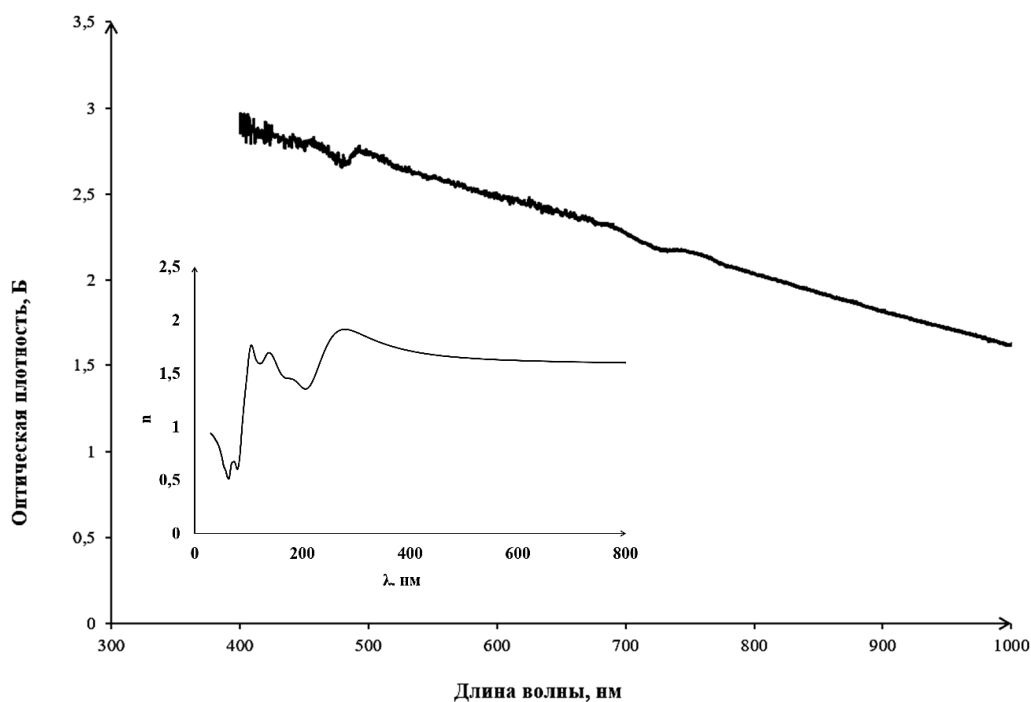


Рис. 3. Спектр поглощения света стабилизированных наночастиц нитрида бора в коллоидном растворе ST BN/ CHCl_3 , на вставке – дисперсия показателя преломления по данным *ab-initio* моделирования

Fig. 3. Light absorption spectrum of stabilized boron nitride nanoparticles in a colloidal solution of ST BN/ CHCl_3 , the insert shows the variance of the refractive index by *ab-initio* modeling

С помощью формулы Рэлея для рассеяния света (1) был рассчитан гидродинамический размер стабилизированных наночастиц нитрида бора

$$d = 2 \left(\frac{1.725 D \lambda^4}{24 \pi^4 l C} \left(\frac{n^2 - 2n_0^2}{n^2 - n_0^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где d – размер наночастиц; D – оптическая плотность; λ – длина волны света; l – толщина слоя коллоидной системы; C – массовая концентрация наночастиц нитрида бора; n – показатель преломления дисперсной фазы; n_0 – показатель преломления дисперсионной среды.

С учетом показателя преломления для стабилизированных частиц нитрида бора ($n = 1,62$), рассчитанного из первых принципов (рис. 3, вставка), что согласуется с [18–20], гидродинамический диаметр дисперсной фазы составил ~ 100 нм. Это значение больше его латерального размера и связано с образованием двойного электрического слоя вокруг наночастицы ST BN/ CHCl_3 в коллоидном растворе.

Измерение спектра флуоресценции (рис. 4) производилось в два этапа. На первом был измерен спектр комбинационного рассеяния света с использованием лазера 532 нм. Так как длины волн спектральных пиков комбинационного рассеяния света зависят от длины волны возбуждающего излучения, то они будут сдвигаться в коротковолновую область спектра при использовании более коротковолнового возбуждающего излучения (473 нм). Природа же флуоресценции основана на зонной структуре материала, и длина волны линий флуоресценции не зависит от длины волны возбуждающего излучения, т. е. остается неизменной при смещении длины волны возбуждающего излучения. Такой линией, согласно проведенным измерениям, является 607 нм. При увеличении длины волны возбуждения до 785 нм энергия кванта становится недостаточной для наблюдения явления флуоресценции.

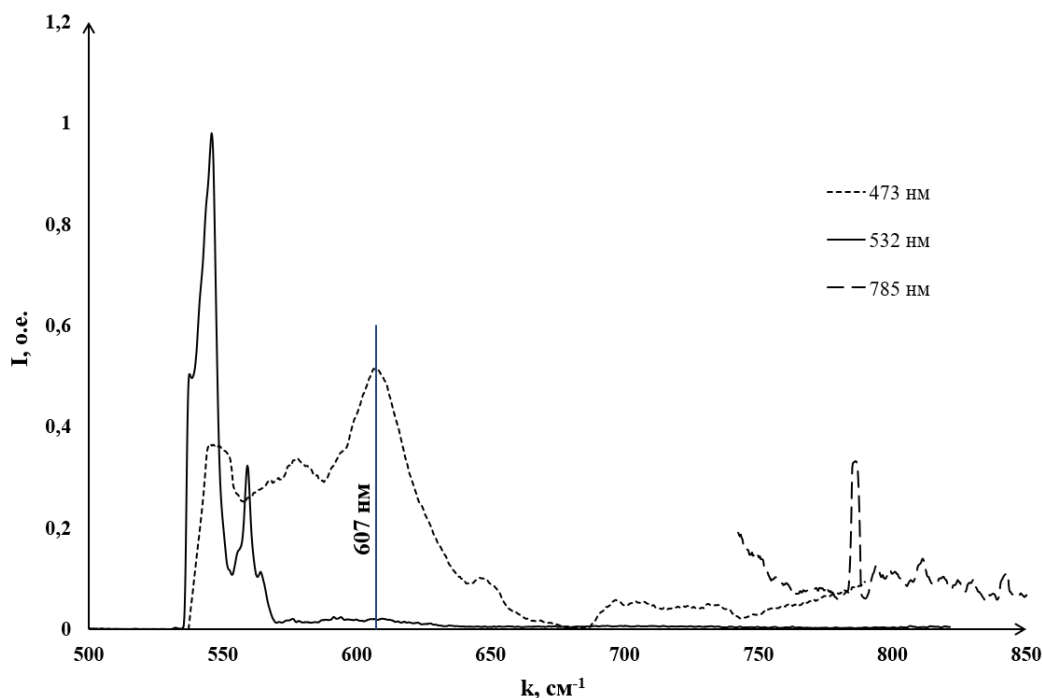


Рис. 4. Флуоресцентные излучения пленки ST BN/ CHCl_3 при лазерной накачке на 532 нм и 473 нм

Fig. 4. Fluorescent emissions of the ST BN film under laser pumping at 532 nm and 473 nm

На рисунке 5 представлены спектры поглощения и ФЛ пленок ST BN/CHCl₃. Каждый спектр асимметричен и содержит более одного пика. Преобладание межмолекулярных взаимодействий приводит к уширению пиков возбуждения, вибронные взаимодействия сужают полосы излучения. Основываясь на одних и тех же электронных переходах, данные спектры согласно правилу Левшина симметричны относительно друг друга, квантовый выход, рассчитанный по формуле $\varphi = I_{\text{фл}} / I_{\text{пг}}$, составил 0,72. Спектр поглощения, смещенный в длинноволновую область, содержит пик максимальной интенсивности при энергии 2,47 эВ. Спектр ФЛ, сдвинутый в коротковолновую область, состоит из трех явных полос. Второй пик с макси-

мумом $\lambda = 578$ нм с нормальным стоксовым сдвигом (~30 нм) связан с вовлечением уровней поверхностных дефектов в процессы рекомбинации. Максимум спектра с энергией 2,04 эВ соответствует anomalно большому стоксовому сдвигу 105 нм. Одной из причин такого anomalного поведения нитрида бора, возможно, является изменение геометрии молекул в их возбужденном состоянии. Часть энергии возбуждения расходуется на колебательное и вращательное движение гексагонов и отклонение их от своих планарных расположений в невозбужденном состоянии. Однако разворот молекул азота, ввиду своей большей массы, происходит с запозданием относительно бора, что приводит к гашению колебаний и уплощает их.

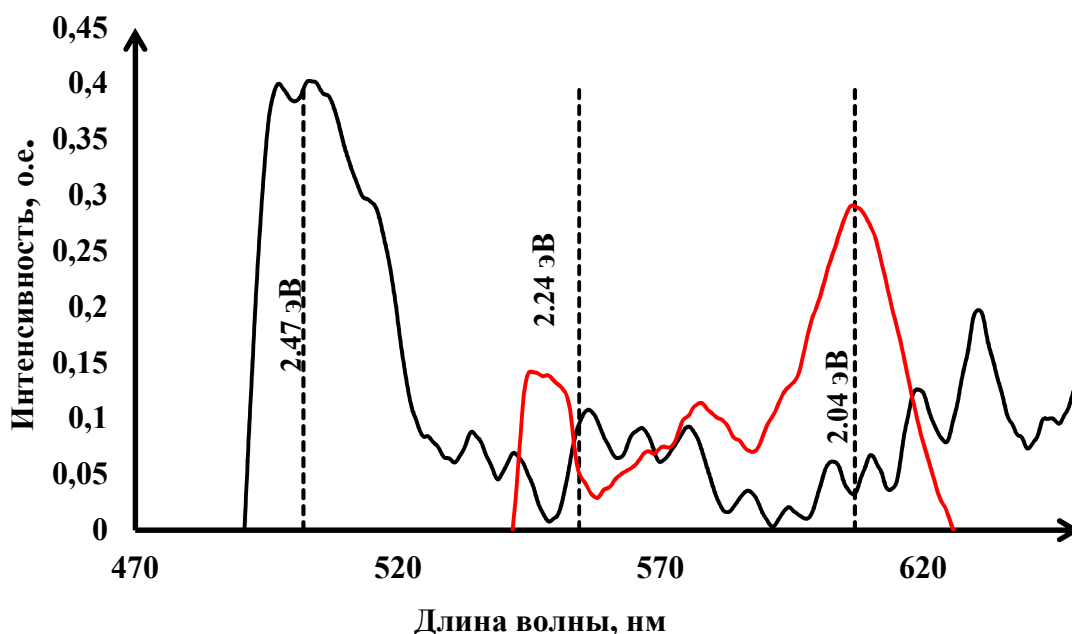


Рис. 5. Спектры поглощения и флуоресценции ленгмюровской пленки нитрида бора при комнатной температуре

Fig. 5. Absorption and fluorescence spectra of the Langmuir boron nitride film at room temperature

Ширина запрещенной зоны была определена экспериментальным образом методом Тауца (рис. 6, а) из дисперсионной зависимости показателя поглощения,

построенной в координатах $(\alpha E)^{1/2} = f(E)$, где α – показатель поглощения среды; E – энергия электромагнитного излучения.

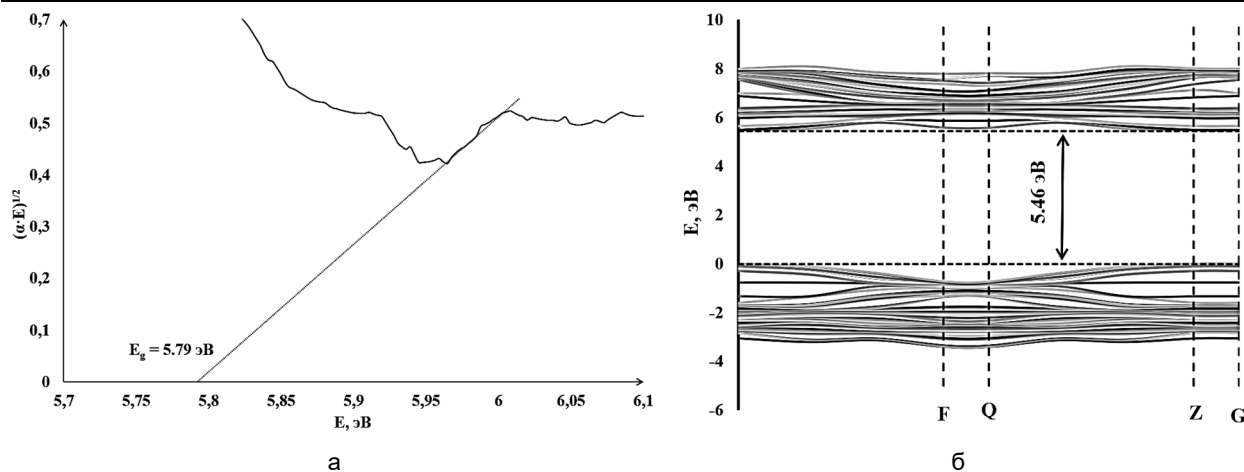


Рис. 6. Спектр поглощения наночастиц ST BN/CHCl₃ в координатах спрямления по методу Тауца (а) и зонная структура частиц ST BN/CHCl₃ (б)

Fig. 6. Absorption spectrum of ST NB nanoparticles in Tautz straightening coordinates (a) and zone structure of ST BN particles (б)

Экстраполяция прямолинейного участка данной зависимости до пересечения с осью абсцисс указывает на ширину запрещенной зоны. Определенная таким образом ширина запрещенной зоны наночастиц ST BN/CHCl₃ составила 5,79 эВ. Данный результат хорошо согласуется с зонной структурой лэнгмюровской пленки, построенной в Materials Studio, – 5,46 эВ (рис. 6, б), что указывает на диэлектрическую природу получаемых покрытий.

Выводы

Получены методом Ленгмюра – Блуджетт сплошные пленки с регулярной

структурой и латеральным размером частиц ~80 нм. Спектр комбинационного рассеяния света подтверждает кристаллическую природу осаждаемых покрытий наличием линии 1360 см⁻¹ с симметрией E_{2g}. Измерены спектры поглощения и флуоресценции с квантовым выходом 0,72, установлено наличие аномально большого стоксового сдвига 105 нм, связанного с изменением геометрии молекул в возбужденном состоянии. Методом Тауца определена ширина запрещенной зоны коллоидных частиц нитрида бора – 5,79 эВ, находящаяся в согласии с данными моделирования из первых принципов 5,46 эВ.

Список литературы

1. Comprehensive characterization and analysis of hexagonal boron nitride on sapphire / Shantanu Saha, A. Rice, Amob Ghosh [et al.] // *AIP Advances*. 2021. Vol. 11, no. 5. P. 055008. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00880>.
2. Epitaxy of hexagonal boron nitride thin films on sapphire for optoelectronics / Gaokai Wang, Junhua Meng, Jingren Chen [et al.] // *Crystal Growth & Design*. 2022. Vol. 22, no. 12. P. 7207–7214. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00880>.
3. Phonon-assisted emission and absorption of individual color centers in hexagonal boron nitride / D. Wigger, R. Schmidt, O. Del Pozo-Zamudo [et al.] // *2D Materials*. 2019. Vol. 6, no. 3. P. 035006. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab1188>.
4. Hexagonal boron nitride quantum dots: Properties, preparation and applications / Xiaofang Zhang, Lulu An, Changning Bai [et al.] // *Materials Today Chemistry*. 2021. Vol. 20. P. 100425. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>.

5. Ellipsometry study of hexagonal boron nitride using synchrotron radiation: transparency window in the Far-UVC / L. Artús, M. Feneberg, C. Attacalite [et al.] // *Advanced Photonics Research*. 2021. Vol. 2, no. 5. P. 2000101. <https://doi.org/10.1002/adpr.202000101>.
6. Direct growth of hexagonal boron nitride films on dielectric sapphire substrates by pulsed laser deposition for optoelectronic applications / Gaokai Wang, Jingren Chen, Junhua Meng [et al.] // *Fundamental Research*. 2021. Vol. 1, no. 6. P. 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.09.014>.
7. Growth of hexagonal boron nitride films on silicon substrates by low-pressure chemical vapor deposition / Xi Chen, Chunbo Tan, Xiaohang Liu [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021. Vol. 32. P. 3713–3719. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-05116-6>.
8. Karim M., Lopes J. M., Ramsteiner M. The impact of ultraviolet laser excitation during Raman spectroscopy of hexagonal boron nitride thin films // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2020. Vol. 51, no. 12. P. 2468–2477. <https://doi.org/10.1002/jrs.6007>.
9. Synthesis of hexagonal boron nitride films on silicon and sapphire substrates by low-pressure chemical vapor deposition / R. Singhal, E. Echeverria, D. N. Mcilroy [et al.] // *Thin Solid Films*. 2021. Vol. 733. P. 138812. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138812>.
10. Improvements in structural and optical properties of wafer-scale hexagonal boron nitride film by post-growth annealing / Seung Hee Lee, Hokyong Jeong, Odongo Francis Ngome Okello [et al.] // *Scientific reports*. 2019. Vol. 9, no. 1. P. 10590. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47093-9>.
11. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride / Seokmo Hong, Chang Seok Lee, Min-Hyun Lee [et al.] // *Nature*. 2020. Vol. 582, no. 7813. P. 511–514. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2375-9>.
12. Rapid and broad-range thickness estimation method of hexagonal boron nitride using Raman spectroscopy and optical microscope / Yeohghoon Jin, Yoonhyuk Rah, Junghoon Park [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2020. Vol. 116, no. 8. P. 081104. <https://doi.org/10.1063/1.5143972>.
13. Emergence of fluorescence in boron nitride nanoflakes and its application in bioimaging / Vijayesh Kumar, Kumar Nikhil, Partha Roy [et al.] // *RSC advances*. 2016. Vol. 6, no. 53. P. 48025–48032. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112910>.
14. Determination of nickel (II) via quenching of the fluorescence of boron nitride quantum dots / Qihong Yao, Yufeng Feng, Rong Mingcong [et al.] // *Microchimica Acta*. 2017. Vol. 184. P. 4217–4223. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>.
15. One-step synthesis of boron nitride quantum dots: Simple chemistry meets delicate nanotechnology / Bingping Liu, Shihai Yan, Zhongqian Song, Mengli Liu [et al.] // *Chemistry—A European Journal*. 2016. Vol. 22, no. 52. P. 18899–18907. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>.
16. Controllable preparation of boron nitride quantum dots with small size and strong blue photoluminescence / Li Chen, Xiaofang Zhang, Zhao Zhao [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 614. P. 126181. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>.
17. Direct measurement of quantum efficiency of single-photon emitters in hexagonal boron nitride / N. Nikolay, N. Mendelson, E. Özelci [et al.] // *Optica*. 2019. Vol. 6, no. 8. P. 1084–1088. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ab6310>.
18. Refractive index dispersion of hexagonal boron nitride in the visible and near-infrared / Seong-Yeon Lee, Tae-Young Jeong, Suyong Jung [et al.] // *Physica status solidi (b)*. 2019. Vol. 256, no. 6. P. 1800417. <https://doi.org/10.1002/pssb.201800417>.
19. A comprehensive review on planar boron nitride nanomaterials: From 2D nanosheets towards 0D quantum dots / Shayan Angizi, Sayed Ali Ahmad Alem, Mahdi Hasanzadeh Azar [et al.] // *Progress in Materials Science*. 2022. Vol. 124. P. 100884. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100884>.
20. Boron nitride for excitonics, nano photonics, and quantum technologies / B. Gil, G. Cassabois, R. Cusco [et al.] // *Nanophotonics*. 2020. Vol. 9, no. 11. P. 3483–3504. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0225>.

References

1. Shantanu Saha, A. Rice, Amob Ghosh, eds. Comprehensive characterization and analysis of hexagonal boron nitride on sapphire. *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 055008. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00880>

2. Gaokai Wang, Junhua Meng, Jingren Chen, eds. Epitaxy of hexagonal boron nitride thin films on sapphire for optoelectronics. *Crystal Growth & Design*, 2022, vol. 22, no. 12, pp. 7207–7214. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00880>
3. Wigger D., Schmidt R., Del Pozo-Zamudo O., eds. Phonon-assisted emission and absorption of individual color centers in hexagonal boron nitride. *2D Materials*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 035006. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab1188>
4. Xiaofang Zhang, Lulu An, Changning Bai, eds. Hexagonal boron nitride quantum dots: Properties, preparation and applications. *Materials Today Chemistry*, 2021, vol. 20, pp. 100425. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>
5. Artús L., Feneberg M., Attacalite C., eds. Ellipsometry study of hexagonal boron nitride using synchrotron radiation: transparency window in the Far-UVC. *Advanced Photonics Research*, 2021, vol. 2, no. 5, pp. 2000101. <https://doi.org/10.1002/adpr.202000101>
6. Gaokai Wang, Jingren Chen, Junhua Meng, eds. Direct growth of hexagonal boron nitride films on dielectric sapphire substrates by pulsed laser deposition for optoelectronic applications. *Fundamental Research*, 2021, vol. 1, no. 6, pp. 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.09.014>
7. Xi Chen, Chunbo Tan, Xiaohang Liu, eds. Growth of hexagonal boron nitride films on silicon substrates by low-pressure chemical vapor deposition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, pp. 3713–3719. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-05116-6>
8. Karim M., Lopes J. M., Ramsteiner M. The impact of ultraviolet laser excitation during Raman spectroscopy of hexagonal boron nitride thin films. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2020, vol. 51, no. 12, pp. 2468–2477. <https://doi.org/10.1002/jrs.6007>
9. Singhal R., Echeverria E., Mcilroy D. N., eds. Synthesis of hexagonal boron nitride films on silicon and sapphire substrates by low-pressure chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 2021, vol. 733, pp. 138812. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138812>
10. Seung Hee Lee, Hokyong Jeong, Odongo Francis Ngome Okello, eds. Improvements in structural and optical properties of wafer-scale hexagonal boron nitride film by post-growth annealing. *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 10590. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47093-9>
11. Seokmo Hong, Chang Seok Lee, Min-Hyun Lee, eds. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride. *Nature*, 2020, vol. 582, no. 7813, pp. 511–514. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2375-9>
12. Yeohghoon Jin, Yoonhyuk Rah, Junghoon Park, eds. Rapid and broad-range thickness estimation method of hexagonal boron nitride using Raman spectroscopy and optical microscope. *Applied Physics Letters*, 2020, vol. 116, no. 8, pp. 081104. <https://doi.org/10.1063/1.5143972>
13. Vijayesh Kumar, Kumar Nikhil, Partha Roy, eds. Emergence of fluorescence in boron nitride nanoflakes and its application in bioimaging. *RSC advances*, 2016, vol. 6, no. 53, pp. 48025–48032. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112910>
14. Qihong Yao, Yufeng Feng, Rong Mingcong, eds. Determination of nickel (II) via quenching of the fluorescence of boron nitride quantum dots. *Microchimica Acta*, 2017, vol. 184, pp. 4217–4223. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>
15. Bingping Liu, Shihai Yan, Zhongqian Song, Mengli Liu. One-step synthesis of boron nitride quantum dots: Simple chemistry meets delicate nanotechnology. *Chemistry—A European Journal*, 2016, vol. 22, no. 52, pp. 18899–18907. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>
16. Li Chen, Xiaofang Zhang, Zhao Zhao, eds. Controllable preparation of boron nitride quantum dots with small size and strong blue photoluminescence. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 614, pp. 126181. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100425>
17. Nikolay N., Mendelson N., Özelci E., eds. Direct measurement of quantum efficiency of single-photon emitters in hexagonal boron nitride. *Optica*, 2019, vol. 6, no. 8, pp. 1084–1088. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ab6310>
18. Seong-Yeon Lee, Tae-Young Jeong, Suyong Jung, eds. Refractive index dispersion of hexagonal boron nitride in the visible and near-infrared. *Physica status solidi (b)*, 2019, vol. 256, no. 6, pp. 1800417. <https://doi.org/10.1002/pssb.201800417>
19. Shayan Angizi, Sayed Ali Ahmad Alem, Mahdi Hasanzadeh Azar, eds. A comprehensive review on planar boron nitride nanomaterials: From 2D nanosheets towards 0D quantum dots. *Progress in Materials Science*, 2022, vol. 124, pp. 100884. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100884>

20. Gil B., Cassabois G., Cusco R., eds. Boron nitride for excitonics, nano photonics, and quantum technologies. *Nanophotonics*, 2020, vol. 9, no. 11, pp. 3483–3504. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0225>

Информация об авторах / Information about the Authors

Локтионова Инна Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

Inna V. Loktionova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Жакин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Anatoly I. Zhakin, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Емельянов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vmemelianov@yandex.ru

Victor M. Emelaynov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vmemelianov@yandex.ru

Сизов Александр Семёнович, доктор технических наук, помощник проректора по научно-исследовательской работе и международным связям, Курский государственный университет; профессор кафедры информационных систем и технологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sizov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8110-9929

Alexander S. Sizov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Assistant Vice Rector for Scientific Research and International Relations, Kursk State University; Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sizov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8110-9929

Абакумов Павел Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики, информатики и математики, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

Рышкова Анна Викторовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики, информатики и математики, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ryshkovaav@kursksmu.net

Неручев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий, научный руководитель научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yuan2003@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8087-874X

Филиппов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики института естественных, математических и технических наук, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация, e-mail: wwfilippow@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4323-351X

Pavel V. Abakumov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Lecturer of the Physics, Informatics and mathematics Department, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

Anna V. Ryshkova, Candidate of Sciences (Pedagogical), Associate Professor of the Physics, Informatics and mathematics Department, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ryshkovaav@kursksmu.net

Yury A. Neruchev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Scientific Supervisor of the Research Center for Condensed Matter Physics Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yuan2003@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8087-874X

Vladimir V. Filippov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Mathematics and Physics of the Institute of Natural, Mathematical and Technical Sciences, Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation, e-mail: wwfilippow@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4323-351X