



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-36-43>

УДК 539.21, 621.382

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ ИЗ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА И ПОЛИЭТИЛЕНА С МИКРОННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

С. Е. МАКСИМОВ, В. Л. ШАПОШНИКОВ, В. Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(Минск, Республика Беларусь)*

**Аннотация.** Исследованы пленочные гетероструктуры из полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности с включенными в их состав микронными частицами полупроводника (графитоподобного нитрида углерода  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ), изготовленные по методике смешивания компонентов и литья. Такие гетероструктуры актуальны для создания экологически дружественных новых оптических элементов обработки информации. Созданы свободные сплошные пленки на основе полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности толщиной 30–50 мкм и пористые пленки на основе полиметилметакрилата толщиной 50–500 мкм. Содержание добавленного полупроводника составляло 5 мас.%, что обеспечивало их целостность и механическую устойчивость при транспортировке и последующих исследованиях. По оптическим спектрам пропускания этих пленок и их фотолюминесценции установлено, что включенный в исследованные полимерные матрицы  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  сохраняет свой размер и полупроводниковые свойства. Частицы распределены в синтезированных материалах квазиравномерно. Обнаружено, что спектры пропускания исследованных гетероструктур имеют квазилинейную зависимость интенсивности прошедшего излучения от длины волны падающего излучения, что в фотонике может быть использовано для создания спектрально чувствительных элементов.

**Ключевые слова:** нанокompозит, полиэтилен, полиметилметакрилат, графитоподобный нитрид углерода, оптические свойства, морфология.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Максимов, С. Е. Оптические свойства композитов из полиметилметакрилата и полиэтилена с микронными частицами графитоподобного нитрида углерода / С. Е. Максимов, В. Л. Шапошников, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-36-43>.

## OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITES OF POLYMETHYLMETHACRYLATE AND POLYETHYLENE WITH MICRON PARTICLES OF GRAPHITIC CARBON NITRIDE

SERGEI MAKSIMOV, VICTOR SHAPOSHNIKOV, VICTOR BORISENKO

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

**Abstract.** Film heterostructures made of polymethyl methacrylate and low-density polyethylene with incorporated micron-sized particles of a semiconductor (graphite-like carbon nitride  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ), fabricated using a component mixing and casting technique, were studied. Such heterostructures are relevant for the creation of new environmentally friendly optical elements for information processing. Free-standing continuous films based on polymethyl methacrylate and low-density polyethylene with a thickness of 30–50  $\mu\text{m}$  and porous films based on polymethyl methacrylate with a thickness of 50–500  $\mu\text{m}$  were created. The content of the added semiconductor was 5 wt.%, which ensured their integrity and mechanical stability during transportation and subsequent studies. Based on the optical transmission spectra of these films and their photoluminescence, it was established that  $g\text{-C}_3\text{N}_4$

incorporated into the studied polymer matrices retains its size and semiconductor properties. The particles are distributed quasi-uniformly in the synthesized materials. It was found that the transmission spectra of the studied heterostructures have a quasi-linear dependence of the intensity of transmitted radiation on the wavelength of the incident radiation, which can be used in photonics to create spectrally sensitive elements.

**Keywords:** nanocomposite, polyethylene, polymethylmethacrylate, graphite-like carbon nitride, optical properties, morphology.

**Conflict of interests.** The authors declare that there is no conflict of interests.

**For citation.** Maksimov S., Shaposhnikov V., Borisenko V. (2026) Optical Properties of Composites of Poly-methylmethacrylate and Polyethylene with Micron Particles of Graphitic Carbon Nitride. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-36-43> (in Russian).

## Введение

Графитоподобный нитрид углерода ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) – дешевый и простой в изготовлении полупроводниковый материал с шириной запрещенной зоны порядка 2,7 эВ [1], что делает его перспективным для применения в оптических устройствах, таких как фильтры, датчики и фотокатализаторы, предназначенных для работы в видимом диапазоне света. Однако хрупкость объемного материала затрудняет его использование, в связи с чем актуальной является задача создания композитных материалов, содержащих микро- и наночастицы материала в инертной матрице.

Цель исследований – создание методики синтеза гетероструктур, в которых микронные частицы  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  включены в органическую полимерную матрицу из полиметилметакрилата (ПММА) или полиэтилена низкой плотности (ПЭНП). Синтезированы и изучены оптические свойства таких гетероструктур, что актуально для разработки нового поколения экологичных, легко утилизируемых пластмасс, обладающих при этом перспективными для фотоники характеристиками.

## Методика проведения эксперимента

Синтез  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  проводили в керамическом тигле объемом 20 см<sup>3</sup> методом пиролиза тиомочевины (химически чистой) в муфельной печи при температурах 500 и 550 °С в течение 30 мин [2, 3]. Для ограничения доступа воздуха к синтезированному материалу тигель изолировали алюминиевой фольгой. После окончания термообработки печь с тиглем остывала естественным путем до комнатной температуры в течение 16 ч. Полученный материал измельчали в агатовой ступке до микродисперсного состояния. Синтез гетероструктур полупроводника в полимерной матрице проводили методом смешивания и литья [4–6] с использованием промышленно выпускаемых ПММА (ГОСТ 17622–72) и ПЭНП (ГОСТ 16338–85), которые предварительно механически измельчали до порошкообразного состояния.

Для формирования пористых гетероструктур на основе ПММА порошок  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  смешивали с порошком ПММА в весовой пропорции 1( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ):20(ПММА), что соответствует 5 мас.%  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . В полученную смесь добавляли ацетон до полного растворения полимера. Эту жидкую композицию наносили на поверхность дистиллированной воды комнатной температуры. Через 3 мин, достаточные для затвердевания нанесенного материала, образовавшиеся дискообразные пластинки композита снимали с поверхности воды и высушивали на воздухе при комнатной температуре до полного испарения растворителя, которое контролировали периодическим взвешиванием образцов с точностью 0,1 мг. Здесь и далее указанное количество добавленного  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  было выбрано из требования обеспечения целостности и механической прочности создаваемых пленок.

Для синтеза образцов с матрицей из ПЭНП полимерную основу растворяли в о-Ксилоле при температуре 115 °С. Порошок  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  добавляли в диметилформамид и перемешивали. Полученные растворы смешивали в пропорции 1( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ):20(ПЭНМ), необходимой для получения соотношения твердых компонентов, и перемешивали в Multi Speed Vortex MSV-3500 при 600 об/мин до полной однородности. После этого 1 мл смеси переносили на предметное стекло размерами 10×15×3 мм. Полученную пленку на стекле высушивали в муфельной печи при 115 °С в течение 5 мин, а затем – при 60 °С в течение 90 мин. Для наращивания толщины пленки процессы нанесения жидкой композиции и сушки повторяли несколько раз, после чего пленку снимали с поверхности стекла пинцетом.

Структуру и морфологию поверхности полученных композитов исследовали с использованием оптического микроскопа Hitachi S-4200 при увеличении до 20 крат. Размеры кристаллических зерен в них определяли с помощью программы imageJ. Пористость синтезированных материалов оценивали гравиметрически по формуле

$$P = \frac{m_1 - m_2}{\rho S d} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $m_1$  – расчетная масса образца из беспористого материала;  $m_2$  – экспериментально определенная масса образца;  $\rho$  – объемная плотность композита, учитывающая соотношение концентраций компонентов в образце;  $S$  – площадь образца;  $d$  – средняя толщина образца.

Оптические спектры отражения и пропускания синтезированных гетероструктур регистрировали с помощью спектрофотометра MC 122 в диапазоне длин волн 300–1000 нм при комнатной температуре. В качестве источника излучения использовали лампу накаливания с вольфрамовой нитью для длин волн более 330 нм.

Исследование фотолюминесцентных свойств осуществляли также при комнатной температуре, используя в качестве источника возбуждающего излучения ксеноновую лампу мощностью 450 Вт. Монохроматором DM160 из спектра излучения лампы выделяли излучение с длиной волны 345 нм. Спектр фотолюминесценции в диапазоне длин волн 365–720 нм регистрировали при помощи монохроматора MS 7504i.

### Результаты исследований и их обсуждение

Внешний вид поверхности сформированных гетероструктур показан на рис. 1.

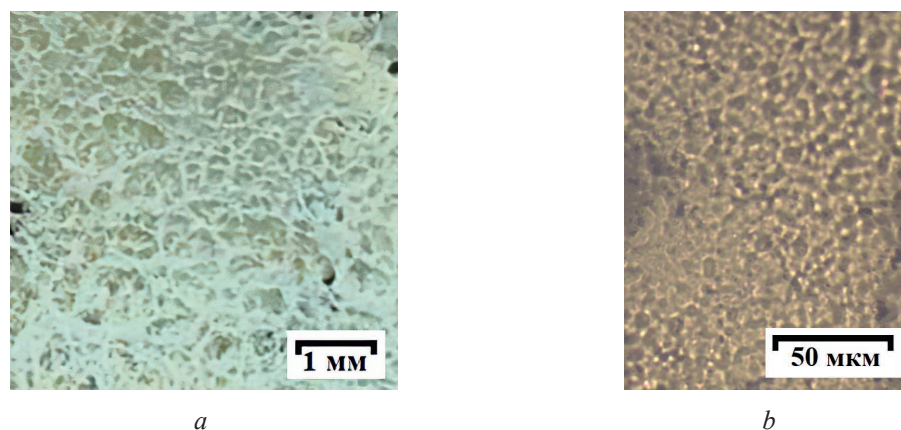


Рис. 1. Морфология поверхности экспериментальных образцов с матрицей из полиметилметакрилата (а) и полиэтилена низкой плотности (b)

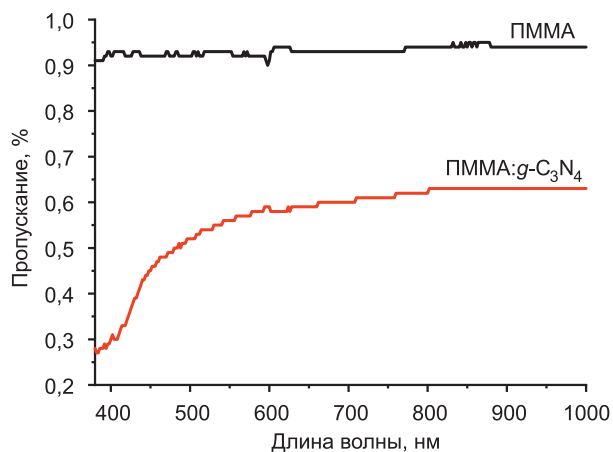
Fig. 1. Surface morphology of experimental samples with a matrix of polymethylmethacrylate (a) and low-density polyethylene (b)

Образцы с матрицей из ПММА имеют сильно развитую поверхность с большим количеством видимых невооруженным глазом пор размером от сотен нанометров до сотен микрометров. Оценить толщину подобной структуры сложно, однако предположительно она лежит в пределах 50–500 мкм. Пористость полученных структур оценена в 62–66 %. В свою очередь, образцы с матрицей из ПЭНП имеют гладкую поверхность с относительно слабым рельефом. Их толщина может варьироваться в зависимости от количества циклов нанесения смеси. В данной статье рассматриваются пленки толщиной 30 и 50 мкм.

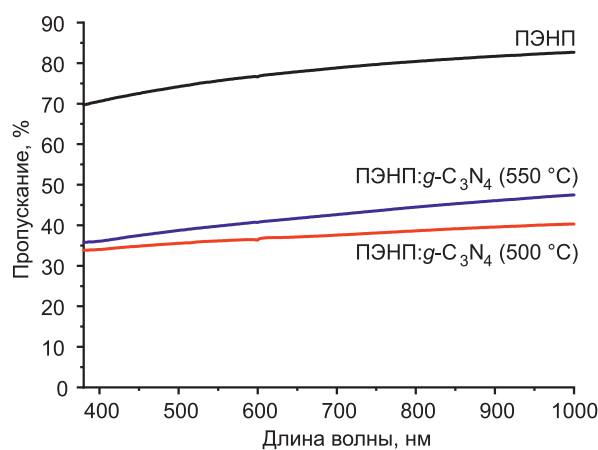
Установлено, что включенные в исследованные полимерные матрицы полупроводниковые частицы  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  сохраняют свой размер и состав. Средний размер зерен  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  в гетероструктурах составляет 13,5 мкм. Распределены они в синтезированных материалах квазиравномерно.

Исследованы оптические свойства гетероструктур на образцах свободных пленок из композиционных материалов, состоящих из частиц  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  в ПММА и ПЭНП. На рис. 2 приведены оптические спектры пропускания пористых беспримесных пленок ПММА и гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$  синтезирован при 550 °C).

Обнаружено существенное влияние  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  на спектральную зависимость оптического пропускания гетероструктуры ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . В коротковолновой области 400–500 нм отмечено почти двукратное снижение пропускания, что, вероятнее всего, связано с дополнительным отражением света кристаллическими частицами  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , проявившимся вследствие развитой пористой структуры всего композита. В более длинноволновой области 600–1000 нм имеет место практически линейная зависимость пропускания от длины волны проходящего излучения. Близкие по характеру спектры пропускания получены на образцах с ПЭНП при температурах синтеза  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  500 и 550 °С (рис. 3).



**Рис. 2.** Оптические спектры пропускания пористых пленок из ПММА и гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  толщиной 50 мкм  
**Fig. 2.** Optical transmission spectra of porous PMMA films and PMMA: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  heterostructures with a thickness of 50  $\mu\text{m}$



**Рис. 3.** Оптические спектры пропускания пленок из ПЭНП и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  толщиной 50 мкм  
**Fig. 3.** Optical transmission spectra of LDPE and LDPE: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  films with a thickness of 50  $\mu\text{m}$

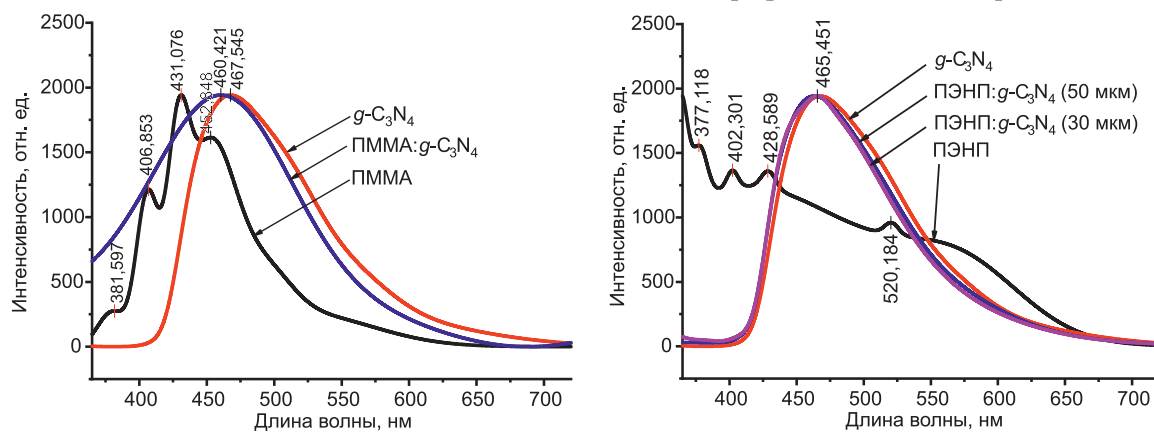
Спектральные зависимости коэффициента пропускания ПЭНП и ПММА в оптическом диапазоне длин волн качественно близки. Что касается количественных показателей, то обращают на себя внимание на два порядка более низкие коэффициенты пропускания у ПММА-пленок. Это связано главным образом с их разупорядоченной пористой структурой, приводящей к усиленному, по сравнению с ПЭНП-пленками, рассеянию и поглощению падающего зондирующего излучения.

Обнаружены следующие закономерности. Добавление частиц полупроводников в органическую матрицу снижает их оптическую прозрачность, что и можно было ожидать, принимая во внимание появление в данном композитном материале центров рассеяния света, связанных с такими частицами. Это подтверждает снижение прозрачности пленок с увеличением их толщины. При этом, как показывает сравнение для ПЭНП с частицами  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , синтезированного при разных температурах (500 и 550 °С), стехиометричность и совершенство кристаллической структуры полупроводниковых частиц также являются значимыми факторами.

Зависимость пропускания полимерных пленок, содержащих частицы полупроводника, от длины волны проходящего через них излучения в диапазоне длин волн 400–1000 нм носит квазилинейный характер, что не типично для этих же пленок без примесей. Наклон аппроксимирующих прямых практически не зависит от толщины пленок. Это может быть объяснено суперпозицией результатов взаимодействия зондирующего излучения с компонентами исследованных гетероструктур.

Полученные спектры фотолюминесценции исходных материалов (ПММА, ПЭНП,  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) синтезированных пленочных гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  представлены на рис. 4 (температуры синтеза  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  – 550 °С). Для удобства восприятия интенсивность излучения всех образцов приведена к общему максимальному значению. Из полученных результатов можно сделать вывод, что введение  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  в полимерную матрицу приводит к пассивации ловушечных уровней на нем. Это видно по уменьшению интенсивности «красного» хвоста, а также по смещению основного пика в сторону больших энергий. Особенно ярко данные эффекты заметны на образце

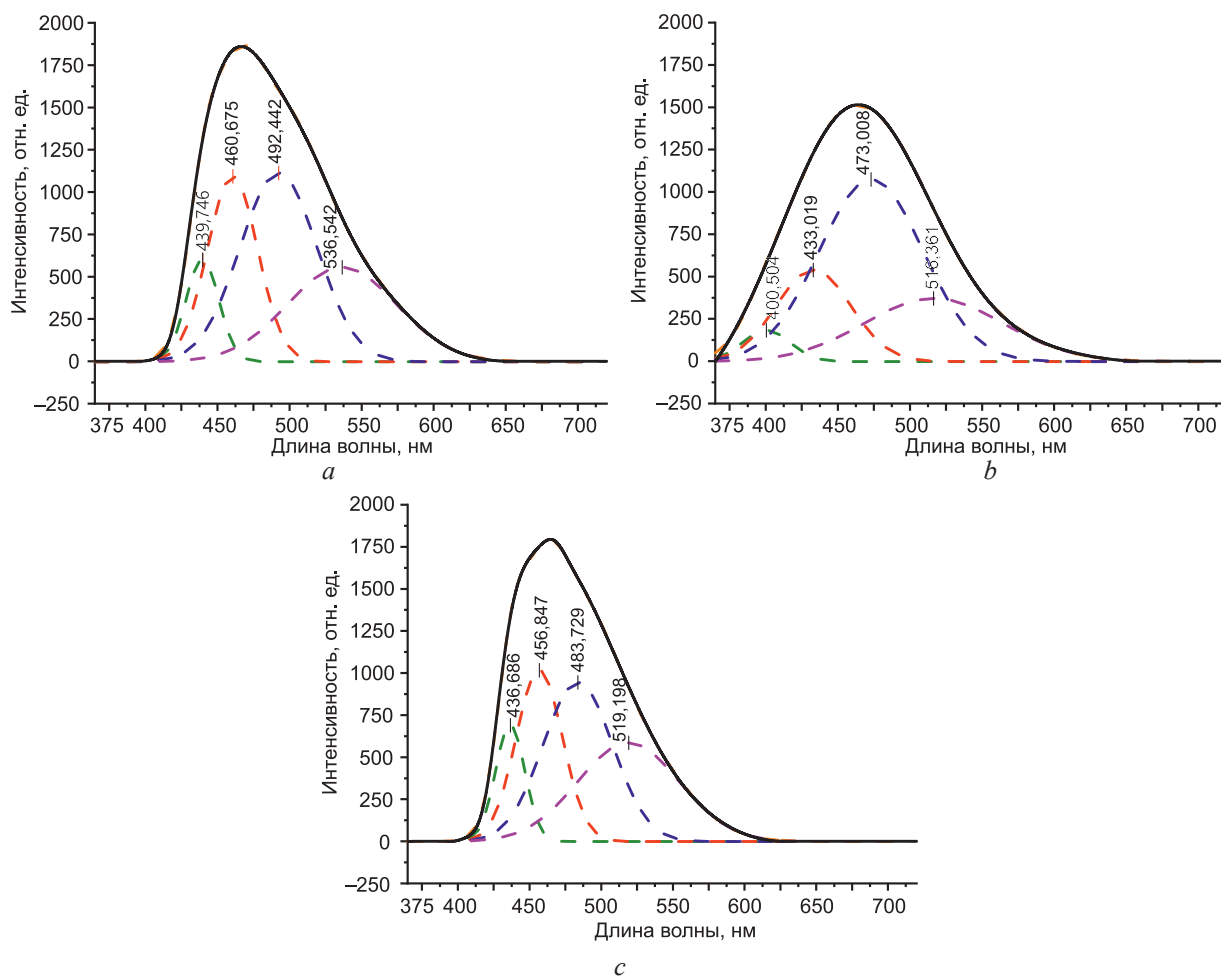
с матрицей из ПММА. В свою очередь, собственные пики фотолюминесценции матрицы в исследуемом диапазоне не оказывают значительного влияния на профиль общего спектра.



**Рис. 4.** Спектры фотолюминесценции исходных материалов (ПММА, ПЭНП,  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) и синтезированных пленочных гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$

**Fig. 4.** Photoluminescence spectra of the starting materials (PMMA, LDPE,  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) and synthesized film heterostructures PMMA: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  and LDPE: $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Для установления природы фотолюминесценции экспериментальных образцов их спектры разложили на гауссовы составляющие (рис. 5).



**Рис. 5.** Разложение спектров фотолюминесценции на гауссовы составляющие:

*a* – исходный  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  (синтезирован при 550 °С); *b*, *c* – ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  соответственно

**Fig. 5.** Decomposition of photoluminescence spectra into Gaussian components:

*a* – initial  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  (synthesized at 550 °С); *b*, *c* – PMMA: $g\text{-C}_3\text{N}_4$  and LDPE: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , respectively

Характеристики пиков гауссовых кривых, аппроксимирующих экспериментальные спектры фотолюминесценции  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  в свободном состоянии и в матрицах из ПММА и ПЭНП, суммарно описывающих наблюдаемые экспериментально зависимости, обобщены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики пиков гауссовых кривых для образцов  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  с матрицами из полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности  
**Table 1.** Characteristics of the peaks of the Gaussian curves for  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  samples with polymethylmethacrylate and low-density polyethylene matrices

| Образец                  | Длина волны, нм | Энергия, эВ | FWHM, нм | Площадь, нм <sup>2</sup> | Возможная природа компонента |
|--------------------------|-----------------|-------------|----------|--------------------------|------------------------------|
| $g\text{-C}_3\text{N}_4$ | 439,75          | 2,82        | 26,95    | 17267,7                  | $\sigma^*\text{-НП}$         |
|                          | 460,68          | 2,69        | 41,12    | 49937,9                  | $\pi^*\text{-НП}$            |
|                          | 492,44          | 2,52        | 62,94    | 74734,9                  | $\pi^*\text{-}\pi$           |
|                          | 536,54          | 2,31        | 89,35    | 53074,8                  | Ловушки                      |
| С матрицей из ПММА       | 400,48          | 3,10        | 39,13    | 7668,0                   | $\pi\text{-}\pi^*$           |
|                          | 433,19          | 2,86        | 60,99    | 35141,3                  | $\sigma^*\text{-НП}$         |
|                          | 473,14          | 2,62        | 85,09    | 97370,7                  | $\pi^*\text{-}\pi$           |
|                          | 516,47          | 2,40        | 113,09   | 44876,6                  | Ловушки                      |
| С матрицей из ПЭНП       | 437,07          | 2,84        | 25,07    | 16947,52                 | $\sigma^*\text{-НП}$         |
|                          | 457,71          | 2,71        | 40,70    | 46169,25                 | $\pi^*\text{-НП}$            |
|                          | 488,95          | 2,54        | 64,59    | 72541,88                 | $\pi^*\text{-}\pi$           |
|                          | 532,29          | 2,33        | 98,35    | 54042,91                 | Ловушки                      |

В [7] было показано, что оптическая ширина запрещенной зоны в  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  лежит в диапазоне 2,73–2,83 эВ в зависимости от условий синтеза. Его валентная зона образована  $\sigma$ -связями C–N с  $sp^3$ -гибридизацией ( $\sigma$ -уровень),  $\pi$ -связями C–N с  $sp^2$ -гибридизацией ( $\pi$ -уровень) и неподеленными электронными парами (НП) азота (уровень НП). Зона проводимости образована возбужденными  $\sigma$ - и  $\pi$ -связями (обозначены в табл. 1 как энергетические уровни  $\sigma^*$  и  $\pi^*$ ). В запрещенной зоне  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  также находятся примесные уровни, связанные с атомами кислорода и дефектами структуры материала. Таким образом, за люминесценцию  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  отвечают состояния, состоящие из полосы  $sp^3$  C–N  $\sigma$ , полосы  $sp^2$  C–N  $\pi$  и состояния НП мостикового нитридного атома [8, 9]. В связи с этим компоненты с пиком на длинах волн в диапазоне 433,19 нм (2,86 эВ)–439,75 нм (2,82 эВ) интерпретировались как основные межзонные переходы типа  $\sigma^*\text{-НП}$ . Излучательные переходы в диапазоне длин волн 456,84 нм (2,71 эВ)–460,68 нм (2,69 эВ) интерпретировались как  $\pi^*\text{-НП}$ -переходы. Переходы в диапазоне длин волн 473,14 нм (2,62 эВ)–492,44 нм (2,51 эВ) интерпретировались как  $\pi^*\text{-}\pi$ -переходы. Оставшиеся переходы были идентифицированы как ловушечные по причине значительных величин параметра FWHM и сравнительно низких значений энергии [10].

Исходя из соотношения площадей под кривыми, соответствующими разным составляющим, можно сделать вывод, что наибольший вклад в фотолюминесценцию как в собственном  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , так и при помещении его в полимерную матрицу из ПММА или ПЭНП, вносят ловушечные уровни. Их пассивация прослеживается по уменьшению интенсивности «красного» хвоста, а также по смещению основного пика в сторону больших энергий. Особенно ярко данные эффекты заметны на образце с матрицей из ПММА. В свою очередь, собственные пики фотолюминесценции матрицы в исследуемом диапазоне не оказывают значительного влияния на профиль общего спектра.

### Заключение

1. Разработанные методики формирования пленок из полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности с включенными в их состав микронными частицами  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  обеспечивают создание сплошных пленок из таких гетероструктур толщиной 30–50 мкм и пористых пленок на основе полиметилметакрилата толщиной 50–500 мкм и пористостью 62–66 %. Включение час-

тиц  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  в эти полимерные матрицы не изменяет собственные фотолюминесцентные свойства данного полупроводника, однако существенно влияет на оптические свойства всей гетероструктуры. Спектры пропускания таких гетероструктур приобретают квазилинейную зависимость интенсивности прошедшего излучения от длины волны падающего излучения, что свидетельствует о суперпозиции результатов его взаимодействия с компонентами таких гетероструктур.

2. Исследованные пленочные гетероструктуры перспективны не только в биокаталитических применениях для фотокаталитической очистки воды от органики, что можно ожидать от присутствия в них  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , но и в фотонике для создания люминесцентных меток и спектрально чувствительных элементов.

3. Проведенные исследования финансировались в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция–2030» (задание 3.1.14).

### Список литературы

1. Структурные и фотолюминесцентные свойства графитоподобного нитрида углерода / А. В. Баглов [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 2. С. 176–180. DOI: 10.21883/0000000000.
2. Синтез графитоподобного нитрида углерода на поверхности  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  / Е. Б. Чубенко [и др.] // Неорганические материалы. 2021. Т. 57, № 2. С. 144–149. DOI: 10.31857/S0002337X21020056.
3. Synthesis and Fabrication of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  Based Materials and Their Application in Elimination of Pollutants / Z. Chen [et al.] // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139054>.
4. Vasile, C. Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review / C. Vasile // Materials. 2018. Vol. 11, No 10. <https://doi.org/10.3390/ma11101834>.
5. Nanocomposite Films and Coatings Using Inorganic Nanobuilding Blocks (NBB): Current Applications and Future Opportunities in the Food Packaging Sector / I. U. Unalan [et al.] // RSC Advances. 2014. Vol. 4, No 56. P. 29393–29428. DOI: 10.1039/C4RA01778A.
6. Solution Casting Method for PVC Nanocomposites with Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes / T. V. Vlasova [et al.] // arXiv preprint arXiv:1112.2062. 2011.
7. Структура спектров фотолюминесценции легированного кислородом графитоподобного нитрида углерода / Е. Б. Чубенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87, вып. 1. С. 14–20.
8. Temperature-Dependent Photoluminescence of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ : Implication for Temperature Sensing / D. Das [et al.] // ASC Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 8, No 3. P. 2181–2186. DOI: 10.1021/acsami.5b10770.
9. The Origins of the Broadband Photoluminescence from Carbon Nitrides and Applications to White Light Emitting / Z. Gan [et al.] // Nana Research. 2016. Vol. 9, No 6. P. 1801–1812. DOI: 10.1007/s12274-016-1073-2.
10. Fe-Doped  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ : High-Performance Photocatalysts in Rhodamine B Decomposition / M. Nguyen Van [et al.] // Polymers. 2020. Vol. 12, No 9. <https://doi.org/10.3390/polym12091963>.

Поступила 01.04.2026

Принята в печать 24.04.2026

### References

1. Baglov A. V., Chubenko E. B., Hnitsko A. A., Borisenko V. E., Malashevich A. A., Uglov V. V. (2020) Structural and Photoluminescent Properties of Graphite-Like Carbon Nitride. *Semiconductors*. 54 (2), 176–180. DOI: 10.21883/0000000000 (in Russian).
2. Chubenko E. B., Baglov A. V., Fedotova Yu. A., Borisenko V. E. (2021) Synthesis of Graphitic Carbon Nitride on the Surface of Nanoparticles  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . *Inorganic Materials*. 57 (2), 144–149. DOI: 10.31857/S0002337X21020056 (in Russian).
3. Chen Z., Zhang S., Liu Y., Alharbi N. S., Rabah S. O., Wang S., et al. (2020) Synthesis and Fabrication of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -Based Materials and Their Application in Elimination of Pollutants. *Science of the Total Environment*. 731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139054>.
4. Vasile C. (2018) Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging. *Materials*. 11 (10). <https://doi.org/10.3390/ma11101834>.
5. Unalan I. U., Cerri G., Marcuzzo E., Cozzolino C. A., Farris S. (2014) Nanocomposite films and Coatings Using Inorganic Nanobuilding Blocks (NBB): current applications and future opportunities in the Food Packaging Sector. *RSC Advances*. 4 (56), 29393–29428. DOI: 10.1039/C4RA01778A.
6. Vlasova T. V., Kryshtob V. I., Mironov V. F., Apresyan L. A., Bokova S. N., Obratsova E. D., et al. (2011) Solution Casting Method for PVC Nanocomposites with Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes. *arXiv preprint arXiv:1112.2062*.
7. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leonenya M. S., Yablonskii G. P., Borisenko V. E. (2020) Structure of the Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *Zhurnal Prikladnoii Spektroskopii*. 87 (1), 14–20 (in Russian).

8. Das D., Shinde S. L., Nanda K. K. (2016) Temperature-Dependent Photoluminescence of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: Implication for Temperature Sensing. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 8 (3), 2181–2186. DOI: 10.1021/acsami.5b10770.
9. Gan Z., Shan Y., Chen J., Gui Q., Zhang Q., Nie S., et al. (2016) The Origins of the Broadband Photoluminescence from Carbon Nitrides and Applications to White Light Emitting. *Nano Research*. 9 (6), 1801–1812. DOI: 10.1007/s12274-016-1073-2.
10. Nguyen Van M., Mai O. L. T., Pham Do C., Lam Thi H., Pham Manh C., Nguyen Manh H., et al. (2020) Fe-Doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: High-Performance Photocatalysts in Rhodamine B Decomposition. *Polymers*. 12 (9). <https://doi.org/10.3390/polym12091963>.

Received: 1 April 2026

Accepted: 24 April 2026

#### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Максимов С. Е.**, инж.-электр. Центра 4.11, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Шапошников В. Л.**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Центра 4.11, БГУИР

**Борисенко В. Е.**, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и наноэлектроники, БГУИР

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 29 612-92-19  
E-mail: maksimov914@gmail.com  
Максимов Сергей Евгеньевич

#### Information about the authors

**Maksimov S.**, Electronics Engineer at the Center 4.11, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Shaposhnikov V.**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Center 4.11, BSUIR

**Borisenko V.**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 29 612-92-19  
E-mail: maksimov914@gmail.com  
Maksimov Sergei