



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-53-61>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.315.592; 54.057

## ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ГЕТЕРОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В.П. ГРЕБНЕВ, Е.Б. ЧУБЕНКО, В.П. БОНДАРЕНКО

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

*Поступила в редакцию 18 января 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Показана возможность пиролитического синтеза композитных гетеросистем на основе макропористого кремния, графитоподобного нитрида углерода и широкозонных полупроводников оксида и сульфида цинка ( $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ ) из механической смеси тиомочевины и ацетата цинка при температуре 500 – 600 °С. Исследование полученных материалов методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показало равномерное заполнение макропористого кремния композитом  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$  с образованием сплошной композитной пленки на поверхности. Фотолюминесценция образцов контролируется температурой синтеза. Ее увеличение приводит к сдвигу максимума свечения в диапазон больших энергий с 544 на 516 нм. Установлено, что фотокаталитическая активность композитных гетеросистем, полученных при меньшей температуре, выше, что обусловлено более развитой морфологией поверхности и меньшей шириной запрещенной зоны. Полученные материалы могут быть использованы для создания фотокаталитических покрытий и функциональных слоев оптоэлектронных приборов.

**Ключевые слова:** графитоподобный нитрид углерода, оксид цинка, сульфид цинка, макропористый кремний, фотолюминесценция, фотокатализ, сканирующая электронная микроскопия, очистка воды.

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

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках задания 1.4 ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» и гранта Министерства образования для магистрантов. Авторы выражают благодарность Д.В. Жигулину за проведение исследований образцов методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

**Для цитирования.** Гребнев В.П., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование и свойства композитных гетеросистем на основе макропористого кремния, графитоподобного нитрида углерода и полупроводниковых соединений. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 53-61.

## FORMATION AND PROPERTIES OF HETEROSYSTEMS BASED ON POROUS SILICON, GRAPHITIC CARBON NITRIDE, AND SEMICONDUCTOR COMPOUNDS

VADIM P. GREBNEV, EUGENE B. CHUBENKO, VITALY P. BONDARENKO

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

*Submitted 18 January 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The possibility of pyrolytic synthesis of composite heterosystems based on macroporous silicon, graphitic carbon nitride and wide band semiconductors zinc oxide and zinc sulfide ( $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ ) from a mechanical mixture of thiourea and zinc acetate at 500 – 600 °C was shown. The obtained material study by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy showed a uniform filling of macroporous silicon with the composite  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$  with the formation of a continuous composite film on the surface. The photoluminescence of the samples was controlled by the synthesis temperature. Increase of photoluminescence leads to shift of luminescence maximum in high energy range from 544 to 516 nm. It was found that photocatalytic activity of composite heterosystems obtained at a lower temperature is higher due to more developed surface morphology and smaller bandgap width. The materials obtained can be used to create photocatalytic coatings and functional layers of optoelectronic devices.

**Keywords:** graphitic carbon nitride, zinc oxide, zinc sulfide, macroporous silicon, photoluminescence, photocatalysis, scanning electron microscopy, water purification.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The work was carried out as part of task 1.4 of the State Scientific Research Institute of the Republic of Belarus “Material Science, New Materials and Technologies” and grant of the Ministry of Education for master students. The authors also express their gratitude to D. Zhigulin for conducting study of the samples by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy.

**For citation.** Grebnev V.P., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Formation and Properties of Heterosystems Based on Porous Silicon, Graphitic Carbon Nitride and Semiconductor Compounds. *Doklady BGUIR*. 2022; 20(4): 53-61.

### Введение

В настоящее время фотокатализ считается одной из наиболее привлекательных и перспективных технологий для прямого сбора, преобразования и хранения возобновляемой солнечной энергии и широкого спектра других экологических применений. С момента появления первых публикаций в области фотоэлектрохимического производства водорода и разложения воды [1–3] гетерогенный фотокатализ стал также важной технологией для расщепления  $\text{CO}_2$ , дезинфекции и проведения селективных химических превращений органических веществ [4, 5]. Следует отметить растущий интерес к использованию полупроводников в качестве фотокатализаторов для различных применений.

Одним из наиболее перспективных фотокаталитических материалов является графитоподобный нитрид углерода ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) – не содержащий металлов органический полупроводник, состоящий из атомов азота и углерода, имеющий множество потенциальных применений для решения энергетических и экологических задач [6, 7]. Фотокаталитические свойства  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  могут быть улучшены путем комбинации с другими полупроводниковыми материалами для реализации так называемой Z-схемы, в которой происходит более эффективное разделение фотоиндуцированных носителей заряда [8–10]. Оксид цинка (ZnO) и сульфид цинка (ZnS) – полупроводники с большой шириной запрещенной зоны, обладающие энергетической структурой, подходящей для проведения гетерогенного фотокатализа, создания эффективных светоизлучающих устройств ультрафиолетового диапазона, а также многих

других применений [11, 12]. Создание гетероструктур на основе  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  с использованием этих широкозонных полупроводников позволит расширить спектральный диапазон поглощения и фотолюминесценции, повысить фотокаталитическую активность и получить гетероструктуры с новыми гибридными свойствами.

С другой стороны, для создания электронных устройств на основе  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  требуется разработка подходов к изготовлению покрытий из  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  на твердых подложках. Одним из подходящих материалов, обеспечивающих высокую адгезию, является пористый кремний [13]. Однако до настоящего времени было опубликовано лишь несколько работ, посвященных синтезу композитов на основе  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и пористого кремния [14, 15]. Поэтому целью данной работы являлось изучение процесса пиролитического синтеза, структурных, оптических и фотокаталитических свойств композитных материалов на основе макропористого кремния и гетеросистем, включающих  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и цинксодержащие полупроводники ZnO и ZnS.

### Методика проведения эксперимента

В качестве подложки для формирования композитов  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  использовали пластины монокристаллического кремния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 12–24  $\Omega\cdot\text{см}$  и кристаллографической ориентацией (100). Слой макропористого кремния формировали путем электрохимического анодирования. Перед анодированием поверхность образцов размером 3×3 см, вырезанных из кремниевой пластины, химически очищали в насыщенном растворе дихромата калия в концентрированной серной кислоте ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ), а затем погружали в 4,5 % водный раствор плавиковой кислоты (HF) для удаления оксида кремния. После этого образцы помещали во фторопластовую электрохимическую ячейку. В ячейку заливали электролит, состоящий из HF (45 %) и диметилсульфоксида (ДМСО), находящихся в объемном соотношении 10:46. Анодирование проводили в течение 20 мин в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока 8  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

Композиты на основе  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  получали по описанной ранее методике [9, 10, 16] путем пиролитического разложения тиомочевины и ацетата цинка, смешанных в равной пропорции по весу. 0,1 г смеси исходных веществ запечатывали вместе с кремниевой подложкой внутри алюминиевого конверта, помещали в закрытый керамический тигель и отжигали в муфельной печи Naberterm L9/12/P300 при различных температурах от 500 до 600  $^\circ\text{C}$ . Скорость нагрева составляла 5  $^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Образцы выдерживали при заданной температуре в течение 30 мин.

Исследование морфологии образцов проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi S-4800. Атомный состав образцов анализировали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на спектрометре Bruker QUANTAX 200. Спектры фотолюминесценции исследовали при комнатной температуре на спектрофотометре SOLAR TII MS7504i, оснащенный CCD-камерой Proscan HS101 в качестве детектора. Для возбуждения фотолюминесценции использовали ксеноновую лампу мощностью 1 кВт. Узкие монохроматические линии выделяли из широкого спектра излучения лампы при помощи двойного монохроматора SOLAR TII DM160. Для возбуждения фотолюминесценции использовали свет с длиной волны 345 нм.

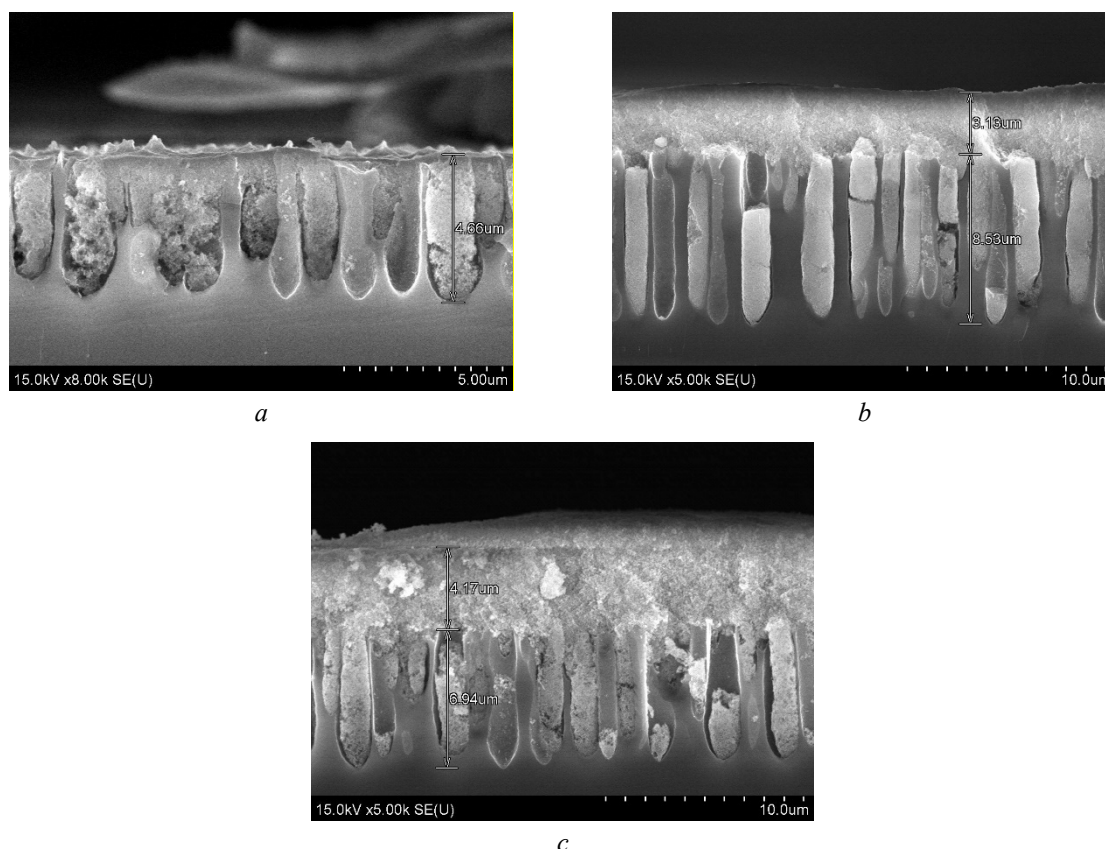
Для исследования фотокаталитической активности композиты помещали в чашку Петри с водным раствором метиленового синего ( $\text{H}_2\text{O} + \text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ ) в концентрации  $10^{-5}$  М объемом 50 мл. До облучения раствор с образцом выдерживали в течение 120 мин в темноте для определения уровня абсорбции красителя. Далее чашку Петри с раствором и образцом облучали светом ксеноновой лампы мощностью 1 кВт. Пробы объемом 1,5 мл изымались из раствора каждые 20 мин. Общая продолжительность выдержки под освещением составляла 200 мин. Фотокаталитическую активность рассчитывали по изменению интенсивности поглощения раствора метиленового синего на длине волны 665 нм, измеренной на спектрофотометре Proscan MC121.

## Результаты и их обсуждение

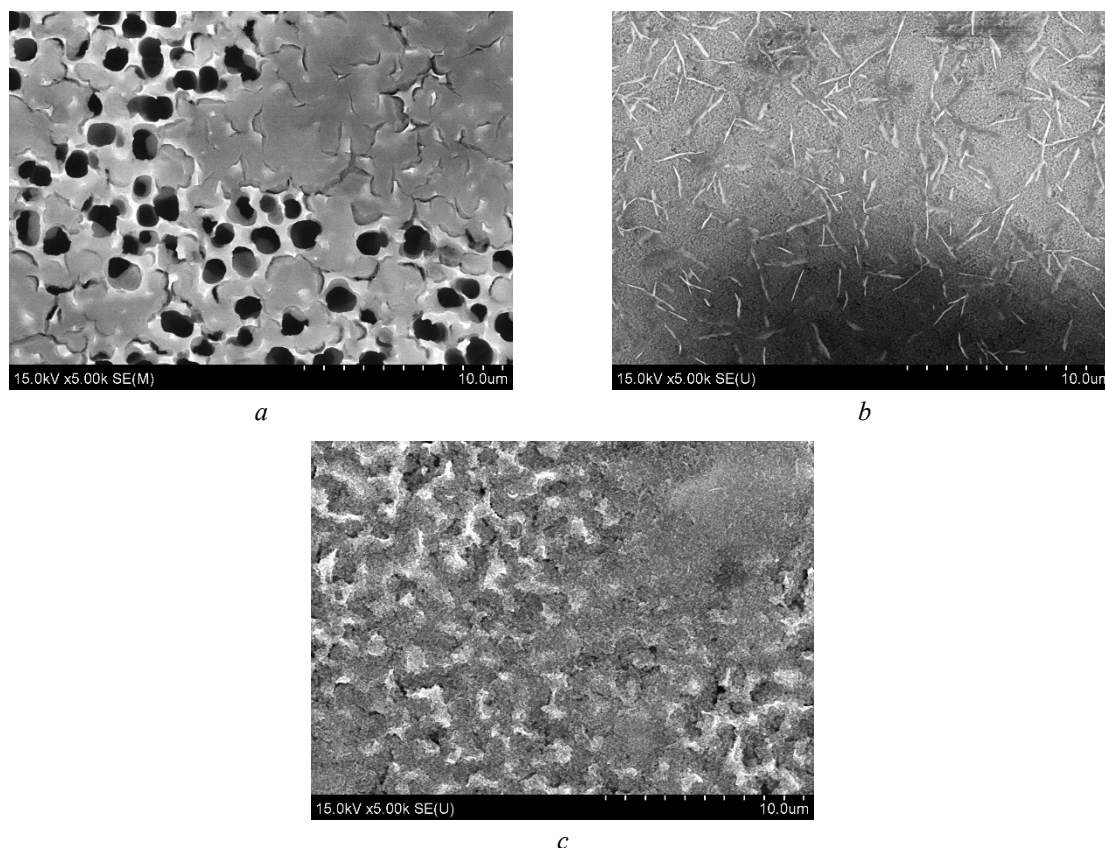
Микрофотографии поперечного скола и поверхности образцов композитного материала, полученного при различной температуре, представлены на рис. 1, 2. Фотографии показывают, что толщина сформированного слоя макропористого кремния составляет 5–8 мкм. На всех образцах в порах и на поверхности пористого слоя образовался плотный материал, который является продуктом разложения смеси тиомочевины и ацетата цинка. На образце, прошедшем обработку при температуре 500 °С, толщина слоя на поверхности не превышает 100–200 нм. Поверхность пленки состоит из частиц со средним диаметром 1,51 мкм. В порах были сформированы столбики из композитного материала, диаметр которых совпадает с внутренним диаметром пор и составляет около 1,8 мкм. Расчетный коэффициент заполнения пор составляет около единицы.

При температуре синтеза 550 °С на поверхности слоя пористого кремния была сформирована пленка толщиной 3,13 мкм. Она состоит из кристаллических частиц с острыми краями и средним размером 1 мкм, выступающих из объемной пленки плотно упакованных более мелких частиц. Внутри каждой поры были сформированы обладающие более плотной структурой столбики из композитного материала. Расчетный коэффициент заполнения пор уменьшился до 0,86.

На поверхности слоя пористого кремния при обработке при 600 °С образовалась пленка бóльшей толщины – 4,17 мкм. Средний размер частиц, образующих пленку на поверхности, составляет не более 100 нм. В случае образца, полученного при температуре 600 °С, коэффициент заполнения пор снизился до 0,8, столбики композитного материала внутри пор обладают более рыхлой структурой, чем у полученных при меньшей температуре синтеза образцов.



**Рис. 1.** Микрофотографии поперечного скола образцов, полученных пиролитическим разложением тиомочевины и ацетата цинка при различных температурах: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С  
**Fig. 1.** Cross-sectional micrographs of samples obtained by pyrolytic decomposition of thiourea and zinc acetate at different temperatures: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С



**Рис. 2.** Микрофотографии поверхностей образцов, полученных пиролизом тиомочевины и ацетата цинка при различных температурах: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С  
**Fig. 2.** Micrographs of surfaces of samples obtained by pyrolytic decomposition of thiourea and zinc acetate at different temperatures: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С

Согласно результатам EDX анализа (табл. 1), композитный материал на поверхности слоя макропористого кремния состоит из углерода (С), азота (N), а также кислорода (O), серы (S) и цинка (Zn).

**Таблица 1.** Результаты EDX-анализа образцов, полученных пиролизом тиомочевины и ацетата цинка при различных температурах  
**Table 1.** Results of EDX analysis of samples obtained by pyrolytic decomposition of thiourea and zinc acetate at different temperatures

Температура синтеза, °С	Концентрация элементного состава образцов, ат. % Concentration of the elemental composition of the samples, at %				
	$C_C$	$C_N$	$C_{Zn}$	$C_O$	$C_S$
500	30,28	25,42	9,96	8,19	8,21
550	17,01	2,89	30,80	8,53	27,35
600	11,09	1,43	20,57	17,84	11,01

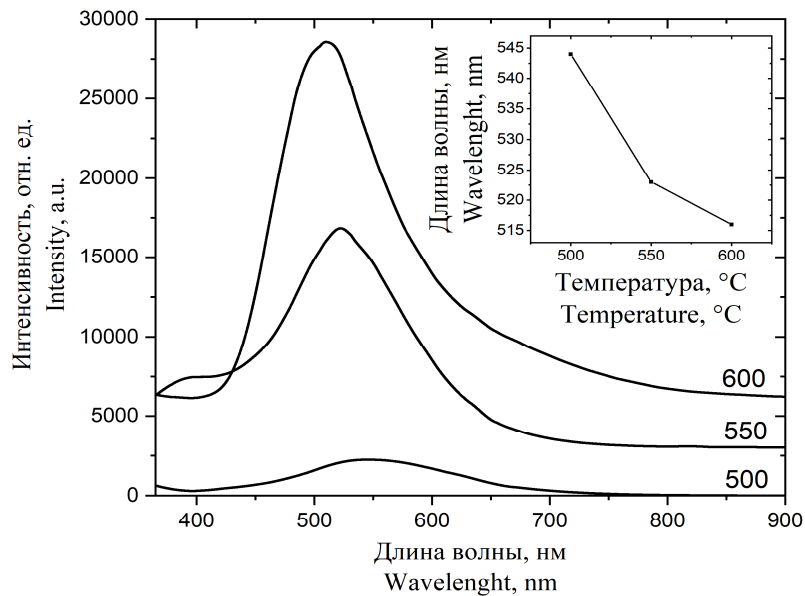
Соотношение концентраций  $C_C/C_N$  в образце, полученном при 500 °С, составляет 1,19, соотношение  $C_{Zn}/(C_O+C_S) = 0,6$ . При температуре синтеза 550 °С соотношение концентраций  $C_C/C_N$  резко увеличивается до 5,89. Соотношение  $C_{Zn}/(C_O+C_S)$  возрастает до 0,85. При более высокой температуре синтеза – 600 °С – соотношение концентраций  $C_C/C_N$  достигло величины 7,75.  $C_{Zn}/(C_O+C_S)$  изменилось до 0,7.

Во всем рассмотренном температурном диапазоне синтеза соотношение  $C_C/C_N$  оказывается выше ожидаемого стехиометрического значения 0,75 для  $g-C_3N_4$  [6], то есть наблюдается избыточная концентрация С. Обычно в образцах  $g-C_3N_4$  наоборот наблюдается дефицит этого элемента. Избыточная концентрация С в образцах может быть связана с горением органических веществ внутри структуры пористого кремния, остающихся после анодирования, в частности, ДМСО.

В то же время численное значение соотношения  $C_{Zn}/(C_O+C_S)$  указывает на избыток кислорода и серы по отношению к цинку. Это позволяет предположить как существование частиц ZnO и ZnS в композите, сформированном на пористой кремниевой подложке, так и на возможное легирование  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  атомами O и S.

Таким образом, исследование элементного состава полученных образцов показало, что они включают  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  со встроенными частицами ZnO и ZnS, сформированный на поверхности макропористого кремния.

Спектры фотолюминесценции композитов, полученных при различных температурах, представлены на рис. 3. Интенсивность фотолюминесценции увеличивалась в диапазоне температур синтеза от 500 до 600 °С. При этом максимумы интенсивности смещаются в более коротковолновый диапазон, соответствующий большей энергии, с 544 нм при температуре синтеза 500 °С на 516 нм при 600 °С. Поведение фотолюминесценции определяется изменением степени полимеризации и структуры запрещенной зоны  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  [10, 17]. При более высоких температурах синтеза степень полимеризации  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  увеличивается, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны [6, 10, 17], однако одновременно с этим происходит и расслаивание  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  с выделением отдельных доменов моноатомной толщины, в которых проявляются квантоворазмерные эффекты, приводящее к росту энергии запрещенной зоны [18]. Доминирование второго процесса определяет смещение максимума фотолюминесценции в сторону более высоких энергий.

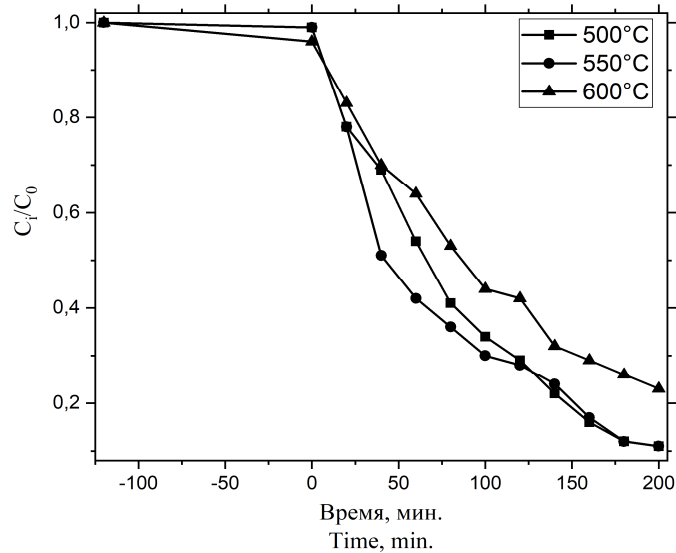


**Рис. 3.** Спектры фотолюминесценции образцов, полученных при различных температурах.

Температурный сдвиг максимума фотолюминесценции представлен на вставке

**Fig. 3.** Photoluminescence spectra of the samples obtained at different temperatures. Temperature shift of the photoluminescence maximum is presented on the inset

Спектры фотокаталитической активности образцов, исследованные при разложении метиленового синего, представлены на рис. 4. Нулевое значение на оси времени на рисунке соответствует включению источника света и началу процесса фотокатализа. Композиты, сформированные при температуре синтеза 500 и 550 °С, в отличие от образца, полученного при 600 °С, абсорбируют краситель при выдержке в растворе в темноте (интервал времени – 120 – 0 мин). Это может быть обусловлено тем, что поверхность образца, сформированного при 600 °С, покрыта более толстой и плотной пленкой гетерокомпозиата  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ , что не дает красителю проникать в поры макропористого кремния. Открытые «пустые» поры являются наиболее вероятной причиной абсорбции красителя образцами.



**Рис. 4.** Изменение относительной концентрации метиленового синего в процессе фотокаталитического разложения в присутствии гетерокомпозитов  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ , полученных при различной температуре

**Fig. 4.** Change in the relative concentration of methylene blue during photocatalytic decomposition in the presence of  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$  heterocomposites obtained at different temperatures

Эффективность разложения метиленового синего образцом, полученным при 600 °С, при увеличении времени выдержки в растворе при воздействии излучения меньше, чем у образцов, соответствующих температуре синтеза 500 и 550 °С. Повышение эффективности разложения красителя обусловлена большей удельной площадью поверхности образцов, полученных при меньших температурах. Пленка гетерокомпозита  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$  на их поверхности не сплошная, что открывает возможность контакта раствора с внутренним объемом пор пористого кремния и столбиками композита в них. Следует обратить внимание на то, что эффективность фотокаталитического разложения красителя в присутствии образцов, полученных при 500 и 550 °С, практически одинакова. Уменьшение фотокаталитической активности гетерокомпозитов, полученных при большей температуре синтеза, может быть также обусловлено ростом ширины запрещенной зоны  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , отмеченным по изменению спектров фотолюминесценции. Облучение белым светом широкого диапазона приводит к сокращению интегрального количества поглощенных фотонов, а значит, меньшему числу фотогенерированных носителей и, соответственно, снижению эффективности фотокатализа.

### Заключение

Показана возможность синтеза композитных гетеросистем на основе  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  с полупроводниковыми частицами ZnO и ZnS на подложках макропористого кремния методом пиролитического разложения в диапазоне температур от 500 до 600 °С механической смеси тиомочевины и ацетата цинка, нанесенной на поверхность кремниевой подложки, помещенной внутрь герметичной алюминиевой оболочки в квазигерметичном пространстве керамического тигля. Установлено, что формирование композитов  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$  происходит внутри пористой структуры с образованием столбиков материала в порах, а также и на поверхности подложки. При повышении температуры синтеза максимум интенсивности фотолюминесценции композитов смещается в более коротковолновую область спектра с 544 на 516 нм, что указывает на увеличение ширины запрещенной зоны, связанное с расслоением  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . Композиты, полученные при температуре синтеза 500–550 °С, демонстрируют более высокую эффективность фотокаталитического разложения модельного красителя метиленового синего, что обусловлено увеличением удельной открытой площади по сравнению с полученными при больших температурах образцами, а также меньшей шириной запрещенной зоны. Таким образом, показано, что оптические и фотокаталитические свойства композитных гетеросистем

$g$ - $C_3N_4/ZnO/ZnS$ , полученных методом пиролитического разложения, контролируются температурой их синтеза.

Полученные композитные материалы могут быть использованы для создания фотокаталитических покрытий и функциональных слоев оптоэлектронных приборов, в том числе интегрированных на одной подложке с кремниевой схмотехникой.

Работа выполнена в рамках задания 1.4 ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» и гранта Министерства образования для магистрантов. Авторы также выражают благодарность Д.В. Жигулину за СЭМ и EDX.

### Список литературы / References

1. Redemann C.E, Lucas H.J. Some derivatives of cyameluric acid and probable structures of melam, melem and melon. *Journal of the American Chemical Society*. 1940;62:842-846. DOI:10.1021/JA01861A038.
2. Teter D.M, Hemley R.J. Low-compressibility carbon nitrides. *Science*. 1996;271:53-55. DOI:10.1126/science.271.5245.53.
3. Gong Y., Li M., Wang Y. Carbon Nitride in Energy Conversion and Storage: Recent Advances and Future Prospects. *ChemSusChem*. 2015;8:931-946. DOI:10.1002/cssc.201403287.
4. Zhang X., Xie X., Wang H., Zhang J., Pan B., Xie Y. Enhanced Photoresponsive Ultrathin Graphitic-Phase  $C_3N_4$  Nanosheets for Bioimaging. *Journal of the American Chemical Society*. 2013;135:18-21. DOI:10.1021/ja308249k.
5. Cao S., Low J., Yu J. Jaroniec M. Polymeric photocatalysts based on graphitic carbon nitride. *Advanced Materials*. 2015;27:2150-2176. DOI:10.1002/adma.201500033.
6. Thomas A., Fischer A., Goettmann F., Antonietti M., Muller J.-O., Schlogl R., Carlsson J.M. Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts. *Journal of Materials Chemistry*. 2008;18:4893-4908. DOI:10.1039/B800274F.
7. Zheng Y., Liu J., Liang J., Jaroniec M., Qiao S.Z. Graphitic carbon nitride materials: controllable synthesis and applications in fuel cells and photocatalysis. *Energy Environ. Sci.* 2012;5:6717-6731. DOI:10.1039/C2EE03479D.
8. Huang D., Chen S., Zeng G., Gong X., Zhou C., Cheng M., Xue W., Yan X., Li J. Artificial Z-scheme photocatalytic system: What have been done and where to go? *Coordination Chemistry Reviews*. 2019;385:44-80. DOI: 10.1016/j.ccr.2018.12.013.
9. Chubenko E.B., Baglov A.V., Leania M.S., Urmanov B.D., Borisenko V.E. Broad band photoluminescence of  $g$ - $C_3N_4/ZnO/ZnS$  composite towards white light source. *Materials science and Engineering B*. 2021;267:115109. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115109.
10. Chubenko E.B., Baglov A.V., Borisenko V.E. One-Step synthesis of visible range luminescent multicomponent semiconductor composites based on graphitic carbon nitride. *Advanced Photonics Research*. 2020;1:2000004. DOI: 10.1002/adpr.202000004.
11. Janotti A., Van de Walle C.-G. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics*. 2009;72:1-30. DOI:10.1088/0034-4885/72/12/126501.
12. Zhang H., Huang F., Gilbert A., Banfield J.F. Molecular Dynamics Simulations, Thermodynamic Analysis, and Experimental Study of Phase Stability of Zinc Sulfide Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry B*. 2003;107:13051-13060. DOI:10.1021/JP036108T.
13. Föl H., Christophersen M., Carstensen J., Hasse G. Formation and application of porous silicon. *Materials Science and Engineering R*. 2002;39:93-141. DOI:10.1016/S0927-796X(02)00090-6.
14. Zouadi N., Messaci S., Sam S., Bradai D., Gabouze N.  $CO_2$  detection with  $CN_x$  thin films deposited on porous silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015;29:367-371. DOI:10.1016/J.MSSP.2014.07.023.
15. Li T. *Synthesis, characterisation and photocatalytic activity of porous silicon-based materials*. Norwich: University of East Anglia; 2017.
16. Grebnev V.P, Chubenko E.B. Synthesis of composite materials based on macroporous silicon and graphitic carbon nitride. *Actual Problems of Solid State Physics*. 2021;2:59-62.
17. Chubenko E.B., Baglov A.V., Leania M.S., Yablonskii G.P., Borisenko V.E. Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2020;87:9-14. DOI: 10.1007/s10812-020-00954-y.
18. Chubenko E.B., Denisov N.M., Baglov A.V., Bondarenko V.P., Uglov V.V., Borisenko V.E. Recovery behavior of the luminescence peak from graphitic carbon nitride as a function of the synthesis temperature. *Crystal Research and Technology*. 2020;55:1900163. DOI: 10.1002/crat.201900163.



### Вклад авторов

Гребнев В.П. подготовил экспериментальные образцы, участвовал в проведении анализа и систематизации полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Чубенко Е.Б. осуществил общее руководство работой, подготовил рукопись статьи.

Бондаренко В.П. интерпретировал и анализировал результаты.

### Authors' contribution

Grebnev V.P. prepared the required samples, finalized the analysis and systematization of the results, as well as prepared a manuscript of the article.

Chubenko E.B. provided general guidance and prepared the manuscript.

Bondarenko V.P. provided assistance in interpreting the results.

### Сведения об авторах

**Гребнев В.П.**, магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Чубенко Е.Б.**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Бондаренко В.П.**, к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

**Grebnev V.P.**, Master's Student at the Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Chubenko E.B.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher of R&D Laboratory 4.3 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Bondarenko V.P.**, Cand. of Sci, Associate Professor, Head of Laboratory 4.3 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-29-821-80-89;  
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com  
Гребнев Вадим Петрович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-29-821-80-89;  
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com  
Grebnev Vadim Petrovich