

Конденсированные среды и межфазные границы

<https://journals.vsu.ru/kcmf/>

Обзор

Обзорная статья

УДК 621.315.592

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12763>

Графитоподобный нитрид углерода: свойства и применение в газовой сенсорике. Обзор

К. Д. Буй^{1✉}, С. С. Налимова¹, В. Т. А. Нгуен²

¹ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5, литерра Ф, Санкт-Петербург 197022, Российской Федерации

²ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), ул. Политехническая, 29, литерра Б, Санкт-Петербург 195251, Российской Федерации

Аннотация

Цель работы. В настоящее время газовые сенсоры представляют большой интерес для выявления заболеваний и оценки эффективности лечения на основе анализа выдыхаемого воздуха. Одними из перспективных материалов для газовых сенсоров являются композиты графитоподобного нитрида углерода с оксидами металлов.

Экспериментальная часть. В статье рассмотрены основные свойства g-C₃N₄. Приведен обзор методов, эффективных для получения его композитов с оксидами металлов.

Выводы. Представлен механизм взаимодействия g-C₃N₄ с газами различной природы. Приведены примеры сенсоров на основе композитов g-C₃N₄ с оксидами металлов.

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, газовая сенсорика, нанокомпозиты

Для цитирования: Буй К. Д., Налимова С. С., Нгуен В. Т. А. Графитоподобный нитрид углерода: свойства и применение в газовой сенсорике. Обзор. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(2): 177–189. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12763>

For citation: Bui C. D., Nalimova S. S., Nguyen V. T. A. Graphite carbon nitride: properties and applications in gas sensing. Review. Condensed Matter and Interphases. 2025;27(2): 177–189. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12763>

✉ Буй Конг Доан, e-mail: congdoan6997@gmail.com

© Буй К. Д., Налимова С. С., Нгуен В. Т. А., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Газовые сенсоры широко используются для обнаружения низких концентраций легковоспламеняющихся, взрывоопасных или токсичных газов и мониторинга загрязнения окружающей среды. Как правило, к газочувствительному материалу предъявляются следующие основные требования: высокая чувствительность, быстродействие и хорошая селективность. Разработка недорогих и надежных сенсорных устройств для детектирования газов, особенно при комнатной температуре, является важной научной и технологической задачей. Для ее решения используют сенсоры, работающие на основе различных принципов, среди которых полупроводниковые адсорбционные сенсоры выгодно отличаются простотой конструкции, низкой стоимостью и большим выбором материалов первичного чувствительного элемента [1, 2]. Принцип их работы основан на изменении сопротивления материала при протекании на его поверхности химических реакций взаимодействия с окисляющими или восстанавливающими газами [3, 4]. Чувствительный материал должен быть выбран таким образом, чтобы он имел большую поверхность, доступную для взаимодействия с молекулами газа, подходящие активные центры для их адсорбции. Основным преимуществом полупроводниковых газовых сенсоров является высокая чувствительность, однако их широкое применение ограничено низкой селективностью и высокими рабочими температурами [5]. Проблемы селективности могут быть решены за счет использования различных чувствительных материалов и реализации мультисенсорных систем [6], а также режима термомодуляции [7, 8]. Для снижения рабочих температур применяется замена нагрева воздействием света ультрафиолетового или видимого диапазона [9, 10]. На протяжении многих лет широко изучались газочувствительные свойства полупроводниковых оксидов *n*-типа, таких как SnO_2 [11], ZnO [12], TiO_2 [13], Fe_2O_3 [14] и WO_3 [15], а также в меньшей степени оксидов *p*-типа, таких как CuO [16], NiO [17] и Co_3O_4 [18]. Исследования смешанных оксидов металлов (перовскиты [19] и кубические шпинели, такие как ферриты [20] и ортостаннанты [21]), показали, что в ряде случаев они могут обладать гораздо большим откликом. В последнее десятилетие большие перспективы для газовых сенсоров показали двумерные (2D) материалы [22], обладающие наноразмерной толщиной и большим соотношением поверхности к объему.

Эффективные газовые сенсоры могут быть получены при объединении преимуществ различных групп материалов и создании композитов оксидов металлов с 2D-материалами [23, 24].

Наноматериалы на основе графитоподобного нитрида углерода ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) нашли широкое применение в различных видах катализа благодаря низкой плотности, высокой химической стабильности, регулируемой морфологией и низкому расходу [25]. $\text{g-C}_3\text{N}_4$ обладает иерархической структурой и состоит из ароматической плоскости и π -сопряженного *s*-триазинового блока, состоящего из гибридизованных многочисленных sp , sp^2 и sp^3 атомов углерода и азота [26].

Обычно такие материалы изготавливаются путем термической конденсации прекурсоров, содержащих азот, таких как меламин, дигиандиамид и мочевина [27, 28]. Морфологией $\text{g-C}_3\text{N}_4$ легко управлять, что позволяет увеличить удельную поверхность и количество адсорбционных центров для реакций с целевыми газами.

Исходя из механизма газочувствительности, большая удельная площадь поверхности и большее количество адсорбционных центров в $\text{g-C}_3\text{N}_4$ позволяют большему количеству молекул газа участвовать в реакциях с целевыми газами. Кроме того, простые и недорогие методы получения $\text{g-C}_3\text{N}_4$ являются преимуществами его применения в области газовой сенсорики. Так как ширина запрещенной зоны $\text{g-C}_3\text{N}_4$ равна 2.7 эВ, электроны валентной зоны легко переходят в зону проводимости при воздействии видимого света, что приводит к отличной каталитической активности и позволяет снизить энергию активации химической реакции, приводящей появлению сенсорного отклика.

Атомы азота придают $\text{g-C}_3\text{N}_4$ полупроводниковые свойства и способность к комплексообразованию, что делает его в некоторых отношениях более эффективным катализатором, чем графен. Однако остаются некоторые недостатки, ограничивающие его дальнейшее применение в этой области. $\text{g-C}_3\text{N}_4$, полученный прямым прогораживанием прекурсора, обычно имеет плотную структуру и малую удельную поверхность [29]. Низкая подвижность носителей заряда и низкая электропроводность чистого $\text{g-C}_3\text{N}_4$ приводят к долгому отклику и плохому быстродействию [30]. Чистый $\text{g-C}_3\text{N}_4$ обладает низкой чувствительностью, высокой рабочей температурой и низкой селективностью [31]. Создание композитов $\text{g-C}_3\text{N}_4$ с оксидами металлов позволяет уве-

личить площадь поверхности, создавая больше поверхностных активных центров. Образование гетероперехода между материалом и $g\text{-C}_3\text{N}_4$ может обеспечивать перенос электронов. Так, композиты $\text{SnO}_2/g\text{-C}_3\text{N}_4$ демонстрируют более высокую чувствительность и селективность к этанолу по сравнению со SnO_2 [32]. Было показано, что сенсор на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}$ обладает отличными характеристиками для обнаружения CH_4 [33].

Целью настоящей работы является анализ свойств $g\text{-C}_3\text{N}_4$, обзор основных методов получения его композитов с оксидами металлов и достигнутых результатов по их применению в газовой сенсорике.

2. Структура $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Прочная ковалентная связь между атомами N и C в слое $g\text{-C}_3\text{N}_4$ обеспечивает его высокую химическую и термическую стойкость [34]. Двумерные π-связанные полимерные системы, включающие триазиновые или три-s-триазиновые (s-гептазиновые) блоки, соединенные третичными аминами, делают $g\text{-C}_3\text{N}_4$ стабильным при комнатной температуре, (рис. 1) [35].

Отдельные слои связаны друг с другом с помощью слабых сил Ван-дер-Вальса. В условиях окружающей среды $g\text{-C}_3\text{N}_4$ термически и химически стабилен, биосовместим, экологически безопасен и устойчив к кислой и щелочной среде [36].

$g\text{-C}_3\text{N}_4$, полученный термической конденсацией N-содержащих прекурсоров, имеет низкую кристалличность из-за появления дефектов вследствие недостаточного дезаминирования в ходе термической конденсации и образования мелона на основе гептазина. В мелоне слои одномерных цепочек NH-связанных мономеров мелема в форме зигзага соединяются во-

дородными связями. В результате носители заряда, образующиеся при воздействии фотонов, концентрируются в определенных областях, что снижает проводимость [37].

3. Свойства $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) в последнее время вызывает интерес исследователей благодаря своим выдающимся свойствам, включая низкую стоимость, большую площадь поверхности, распространённость в природе, быстрый перенос электронов, π-π сопряжение связей, отсутствие металлов [38]. Это отличный полимерный полупроводник, работающий в видимой области спектра, обладающий биосовместимостью и отличными каталитическими свойствами.

Пача и др. синтезировали объёмный и тонкопленочный $g\text{-C}_3\text{N}_4$ методом термической поликонденсации меламина [39]. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия использована для определения химического состава объемных и тонких плёнок $g\text{-C}_3\text{N}_4$. В спектрах наблюдаются пики, соответствующие C 1s, N 1s, а также пик O 1s слабой интенсивности, (рис. 2).

В работе показаны C-V характеристики структуры ITO/ $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ от -5 В до 5 В для широкого диапазона частот от 1 кГц до 1 МГц. На частоте 1 кГц емкость составляет 3.42 нФ, при увеличении частоты до 100 кГц она уменьшается до 3.18 нФ. Снижение емкости на высоких частотах может быть объяснено низкой проводимостью $g\text{-C}_3\text{N}_4$. А также в работе показана частотная зависимость диэлектрической проницаемости тонкой плёнки $g\text{-C}_3\text{N}_4$, значения которой составляют 8.05–7.17 в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц.

Джустро и др. отметили, что пленка $g\text{-C}_3\text{N}_4$ имеет показатель преломления ($n_D = 2.43$), ко-

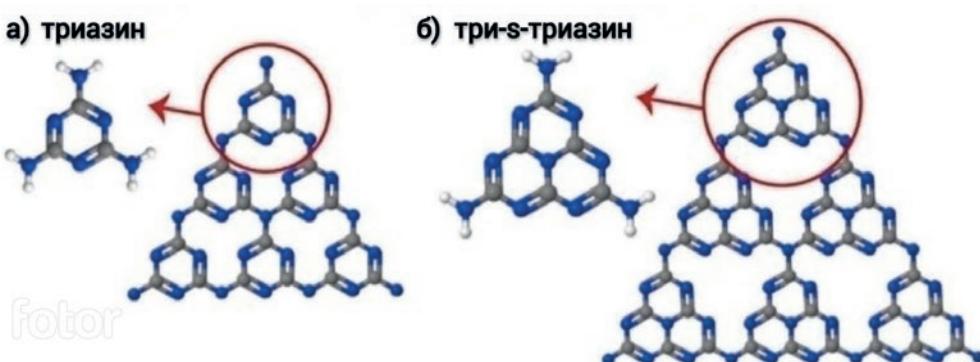


Рис. 1. (а) Триазиновая и (б) три-s-триазиновая (гептазиновая) двумерная сеть на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (белые, серые и синие шарики обозначают H, C и N соответственно) [35]

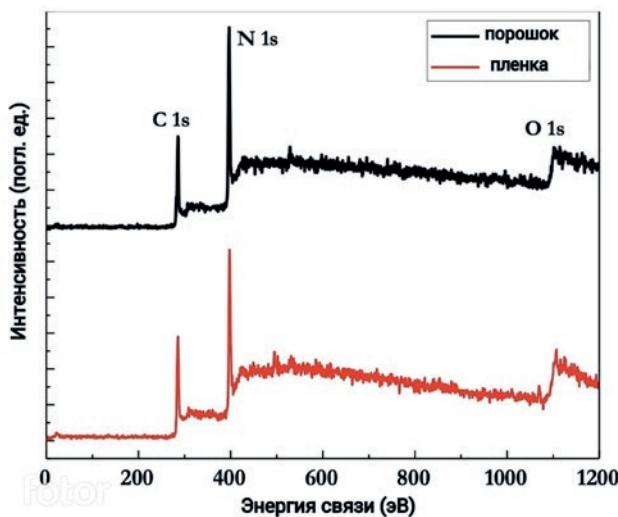


Рис. 2. Рентгеновский фотоэлектронный спектр объемного и тонкопленочного $\text{g-C}_3\text{N}_4$ [31]

торый является самым высоким для полимерных материалов [40]. Высокоориентированные и сопряженные пленки $\text{g-C}_3\text{N}_4$ демонстрируют интенсивную синюю фотолюминесценцию (ФЛ) при УФ-возбуждении. Спектры ФЛ пленок $\text{g-C}_3\text{N}_4$ отличаются от спектров порошков из-за большого количества разрешенных излучательных переходов между различными энергетическими уровнями при возбуждении светом. При толщине пленки более 1 мкм спектры поглощения аналогичны спектрам поглощения объемного порошка. Край поглощения оптического излучения показывает зависимость поглощения от толщины [41].

Спектры поглощения порошков $\text{g-C}_3\text{N}_4$ показывают, что край поглощения материала находится около $\lambda = 450$ нм [42]. Напротив, пленки $\text{g-C}_3\text{N}_4$ демонстрируют спектры поглощения, зависящие от толщины. Пленка $\text{g-C}_3\text{N}_4$ с толщиной 55 нм демонстрирует интенсивные полосы поглощения при длине волны $\lambda = 307$ нм и две дополнительные полосы при $\lambda = 366$ и 386 нм; они обусловлены переходами $\pi-\pi^*$, $\pi-\pi^*$ и LP- π^* соответственно, где π^* – уровни возбужденных π -орбиталей. Различия между длинами волн рассчитанных и измеренных полос поглощения связаны с размерами моноатомных листов и толщиной пленок материала. Теоретические расчеты показывают, что энергетические зоны будут разделяться на дискретные энергетические уровни.

Являясь соединением углерод/азот с три-*s*-триазинами, связанными через третичные амины, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ имеет соответствующие положения зон (зона проводимости (СВ) при ≈ -1.1 эВ и валентная зона (VB) при $\approx +1.6$ эВ относительно стандартного водородного электрода (НВЕ) при $\text{pH} = 0$) [43]. Химический потенциал позволяет $\text{g-C}_3\text{N}_4$ проявлять окислительно-восстановительные свойства в различных фотокатализических реакциях при облучении видимым светом. Как показано на рис. 3, процесс преобразования энергии под действием солнечного света в объемном $\text{g-C}_3\text{N}_4$ включает четыре фактора, а именно: возбуждение фотонов, генерация/разделение фотогенерированных носителей заряда и поверхностные окислительно-восстановительные реакции с участием электронов/дырок [44].

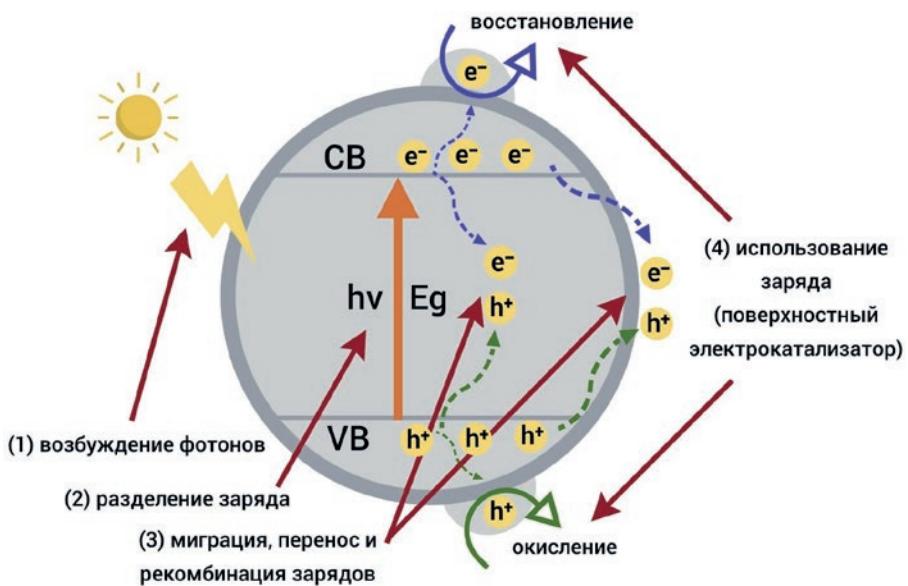


Рис. 3. Четыре основных процесса фотокатализа $\text{g-C}_3\text{N}_4$

Недостатками объёмного $g\text{-C}_3\text{N}_4$ являются высокая объёмная или поверхностная рекомбинация. Это ограничивает возможности чистого $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в достижении высоких фотокаталитических характеристик.

Для преодоления недостатков чистого $g\text{-C}_3\text{N}_4$ получают и исследуют его композиты с другими материалами. В частности, для улучшения сенсорных и фотокаталитических характеристик применяют композиты с оксидами металлов.

4. Методы получения композитов оксидов металлов с $g\text{-C}_3\text{N}_4$

В литературе сообщалось о синтезе композитных материалов $g\text{-C}_3\text{N}_4$ с различными соединениями, включая TiO_2 [45], ZnO [46], CdS [47], Bi_2WO_6 [48], Bi_2MoO_6 [49], In_2O_3 [50], Ag_3PO_4 [51], AgBr [52] и MoS_2 [53]. Гетероструктура, сформированная на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$, может быть образована не со всеми материалами. Поскольку эффективность гетероструктуры, стимулируемой видимым светом, зависит от способности гибридизировать связи, главными критериями выбора материала является соответствующая зонная структура. Кроме того, на границе раздела происходит изгиб зон из-за разницы потенциалов между полупроводниками, находящимися в контакте. Фотогенерированные электроны и дырки движутся в противоположных направлениях за счет внутреннего поля, создаваемого изгибом зон. В результате пары электронов и дырок эффективно разделяются и объединяются на противоположных сторонах гетероперехода. Смешивание с помощью УЗ, осаждение-прокаливание, УЗ-диспергирование, гидротермальный метод, осаждение при воздействии УЗ являются методом синтеза композитов $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Ультразвуковая обработка является наиболее простым способом получения композитов на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Метод включает в себя смешивание порошков $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (полученных из азотсодержащих прекурсоров, таких как мочевина, меламин) с соответствующими металлами или оксидами металлов в воде или органическом растворителе. При этом возможно образование композитов, в которых оксид металла распределяется по поверхности $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в процессе перемешивания. Нанокомпозит извлекается после полного испарения растворителя или воды при термообработке. Кроме того, другие факторы, такие как механическое перемешивание и движение частиц в ультразвуковом поле, могут изменять процесс осаждения и растворения. Простая процедура осаждения-прокаливания была использована Юанем и др. [46] для получения нанокомпозитов, состоящих из ZnO на нанолистах $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (рис. 4).

Нанокомпозиты на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ могут быть получены при термической обработке при высоких температурах (прокаливании) оксидов металлов с прекурсорами $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Благодаря своим преимуществам, включая малые временные затраты, низкую стоимость, простоту и высокий выход, этот метод является популярным для изготовления нанокомпозитов на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Однако полученные композиты имеют малую удельную поверхность, частицы большого размера, неоднородное распределение частиц и др., так как в этом методе нет смешивания прекурсоров в водной среде, и требуются более высокие температуры прокаливания. Формирование гетероструктуры между компонентами в изготовленном нанокомпозите снижает вероятность рекомбинации электронно-дырочных пар.

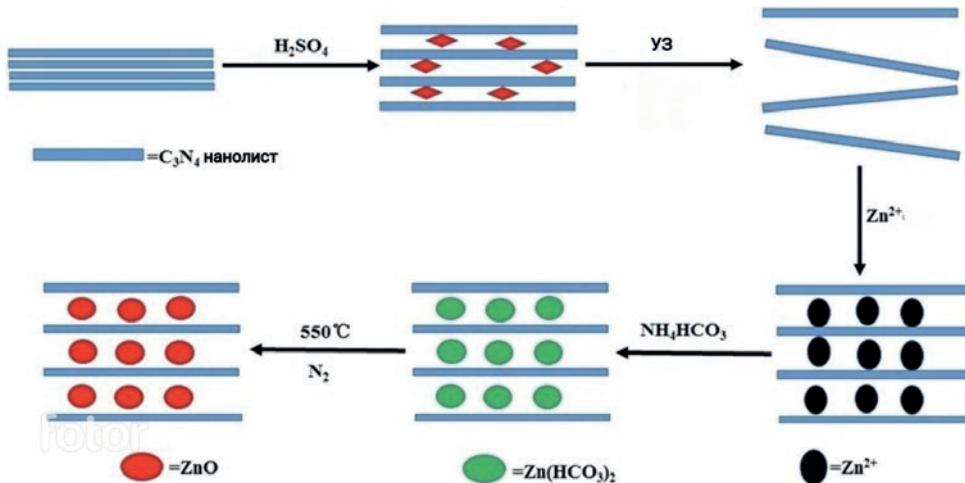


Рис. 4. Процесс изготовления нанокомпозитов из нанолистов $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ZnO [46]

Гидротермальный метод стал перспективной технологией для создания нанокомпозитных материалов [54]. При использовании этого метода размер кристаллитов, морфология и кристалличность материалов могут быть улучшены за счёт того, что процесс протекает при относительно низких температурах. Кроме того, существуют и другие параметры, такие как давление, температура реакции, pH, добавки, типы растворителей, время выдержки и состав прекурсоров, которые определяют химию поверхности и играют важную роль в процессе синтеза. Идресс и др. [55] использовали гидротермальный метод для формирования гетероструктуры пентоксид ниobia (Nb_2O_5)/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (рис. 5).

Благодаря низкой температуре, используемой в этом процессе, по сравнению с частицами, полученными с помощью твердотельной технологии, полученные гидротермальным синтезом частицы имеют большую удельную поверхность, меньший размер и лучшую стабильность.

Синтез наноматериалов с использованием микроволнового метода получил широкое распространение благодаря однородному нагреву прекурсоров с высокой скоростью. В результате происходит образование кристаллитов с узким распределением по размерам, что объясняется последовательным зарождением и быстрым ростом кристаллов [56]. В природе $\text{g-C}_3\text{N}_4$ нестабилен как органический полимер и разла-

гается при высоких температурах. Образование контакта между $\text{g-C}_3\text{N}_4$ и полупроводником способствует активации кислорода и, следовательно, его разложению [57].

Таким образом, в работе рассмотрены методы синтеза материалов на основе $\text{g-C}_3\text{N}_4$ из различных прекурсоров, которые направлены на исследование методов синтеза $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в виде квантовых точек, нанолистов или тонких пленок, а также композитных гетероструктур $\text{g-C}_3\text{N}_4$ с другими материалами.

5. Применение $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в разработках газовых сенсоров

Высокая адсорбционная способность и уникальная морфология поверхности $\text{g-C}_3\text{N}_4$ способствуют высокой чувствительности. Высокая эффективность переноса носителей заряда в $\text{g-C}_3\text{N}_4$ при взаимодействии с различными молекулами целевых газов в значительной степени зависит от типа электропроводности. Предполагается, что механизм чувствительности может быть объяснен самопротонированием нанолистов $\text{g-C}_3\text{N}_4$. На рис. 6 показан механизм чувствительности $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Тип электропроводности в $\text{g-C}_3\text{N}_4$ сильно зависит от наличия функциональных групп на его поверхности. В работе [59] обработка волокон $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в H_2SO_4 способствует их протонированию и обеспечивает дырочную проводимость. Кроме

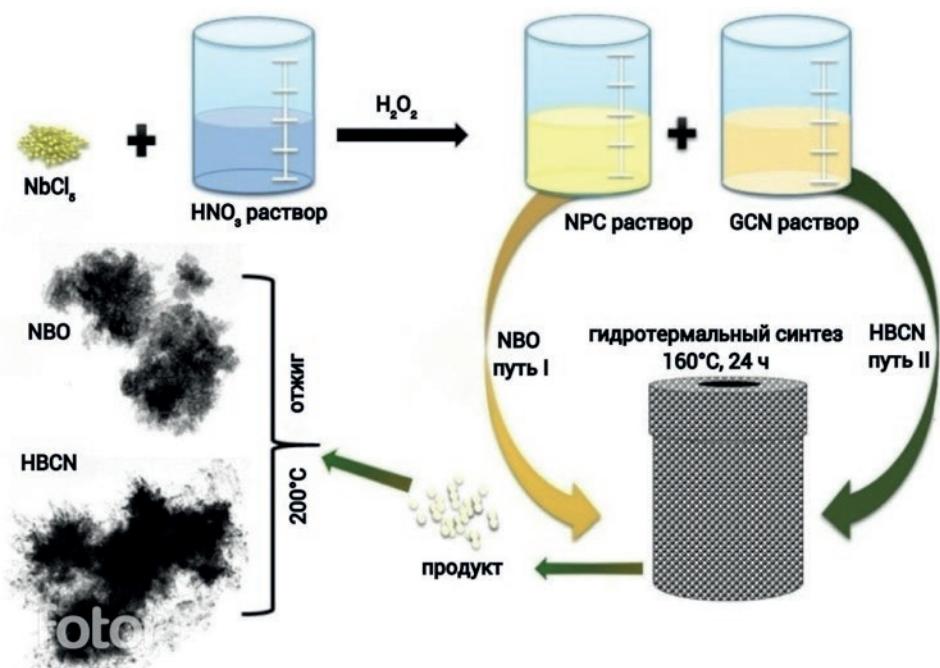


Рис. 5. Схема гидротермального метода синтеза Nb_2O_5 и $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{g-C}_3\text{N}_4$ [55]

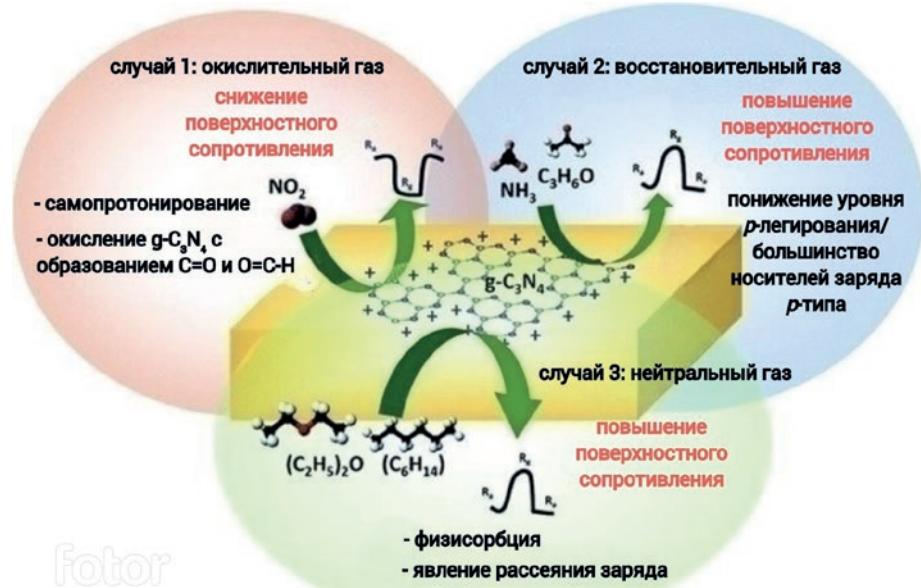


Рис. 6. Механизм чувствительности g-C₃N₄ при обнаружении окисляющего (случай 1), восстановливающего (случай 2) и нейтрального газа (случай 3) [58]

того, в процессе высокотемпературного отжига вероятно разложение остаточных групп SO₄²⁻ до SO₃, что приводит к окислению волокон g-C₃N₄ с образованием кислородсодержащих групп, таких как C=O и O=C-OH, проявляющих электронно-акцепторные свойства. Это способствует повышению концентрации дырок.

Нитриды углерода содержат аминогруппы, которые притягивают молекулы кислорода [60]. Когда молекулы NO₂ взаимодействуют с аминогруппами в g-C₃N₄, они захватывают больше электронов из-за более высокой электроотрицательности по сравнению с атомами углерода. После этого происходит процесс переноса заряда с атома N в g-C₃N₄ на атом NO₂. При адсорбции NO₂, типичного газа – акцептора электронов, сопротивление g-C₃N₄ уменьшается. Кроме того, NO₂ может вступать в реакцию с водяными парами в воздухе с образованием HNO₃, которая может протонировать волокна g-C₃N₄, тем самым уменьшая сопротивление. Для сравнения, полученные сенсоры также использовались для обнаружения газов, обладающих слабой способностью отдавать электроны, таких как NH₃ и ацетон. При взаимодействии восстановливающих газов с g-C₃N₄ его поверхностное сопротивление, напротив, увеличивается, что является типичным свойством полупроводника p-типа. Однако при воздействии нейтрального газа (гексана или эфира) эффект рассеяния носителей заряда на поверхности становится доминирующим из-

за физически адсорбированных молекул на поверхности g-C₃N₄, что приводит к увеличению поверхностного сопротивления. Таким образом, большая площадь и объем пор, а также площадь поверхности чистого g-C₃N₄ являются основными факторами для высокого отклика сенсора на его основе [58].

Газовые сенсоры на основе g-C₃N₄ разделяются в зависимости от процесса окисления или восстановления на поверхности этого материала. Это приводит к соответствующему изменению величины поверхностного сопротивления материала. В случае восстановливающего газа g-C₃N₄ доказал свою способность определять токсичные газы, промышленные и бытовые выбросы, такие как уксусная кислота, п-бутиanol,monoоксид углерода [32]. Кроме того, имеются возможности для определения других газов, таких как ацетон, метан, этанол, водород и толуол [61]. В случае окисляющих газов g-C₃N₄ был исследован и доказал свою применимость для обнаружения газов NO₂ и CO₂. Кроме того, g-C₃N₄ может определять влажность окружающей среды. Однако применение газовых сенсоров на основе чистого g-C₃N₄ весьма ограничено. Это привело к модификации g-C₃N₄ для улучшения его применимости в газовых сенсорах. Для улучшения электрической структуры материала g-C₃N₄ используются такие методы, как изменение морфологии, легирование и образование гетероструктур. Основным направлением явля-

ется комбинированное изменение структуры поверхности и создание гетероструктуры с оксидами металлов. Поскольку при этом увеличивается площадь поверхности, на которой происходит реакция, повышается концентрация носителей заряда и минимизируется рекомбинация электронов и дырок. В таблице 1 обобщены основные работы по газовым сенсорам с применением $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

В работе [66] показано, что добавление углерода в $g\text{-C}_3\text{N}_4$ способствует увеличению чувствительности к NO_2 , которое обусловлено контактом между углеродом и сетью $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Это связано с делокализованными π -связями, приводящими к модификации электронной структуры $\text{C}/g\text{-C}_3\text{N}_4$ и улучшению движения электронов. Газочувствительность $g\text{-C}_3\text{N}_4$ с добавлением 10 мас. % в 3 раза выше, чем у исходного $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Имеется ряд публикаций, посвященных разработкам газовых сенсоров на основе композитов $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и оксидов металлов. Например, в работе [72] был получен нанокомпозит $\text{ZnO/rGO/g-C}_3\text{N}_4$ для детектирования этанола. Разработанный сенсор показал отличные характеристики: чувствительность к 100 ppm этанола при $300^\circ\text{C} \sim 178$ (R_d/R_g), предел обнаружения ниже 500 ppb. Добавление $g\text{-C}_3\text{N}_4$ приводит к увеличению чувствительности в 2 раза, что объясняется механизмом электронной сенсибилизации. Улучшенная чувствительность сенсора на основе нанокомпозита $\text{ZnO/rGO/g-C}_3\text{N}_4$ к этанолу в основном обусловлена сочетанием эффектов малого размера ZnO , превосходной электронной проводимости rGO, образования $p\text{-}n$ гетероперехода между ZnO и rGO и улучшенной генерации

электронов и дырок благодаря широкой запрещенной зоне $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Авторами [68] синтезирован эффективный сенсор ацетона на основе нанокомпозитов $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{WO}_3$, отклик R_d/R_g которого к 100 ppm ацетона при 340°C составил 35. Полученное значение приблизительно в 3 раза превышает отклик чистого WO_3 . Уникальные сенсорные свойства объясняются синергетическими эффектами, объединяющими ультратонкие нанолисты, подходящую кристаллическую фазу и пористую поверхность WO_3 , а также увеличение удельной поверхности и изменение электрических свойств после модификации $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Иерархическая структура ZnO , декорированная $g\text{-C}_3\text{N}_4$, была синтезирована в работе [33]. Результаты показали, что отклик (R_d/R_g) $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}$ к 1000 ppm CH_4 при 320°C составил 11.9 и превышает отклик ZnO при тех же условиях в 2.2 раза. Выделены факторы, определяющие улучшение сенсорных свойств: увеличение удельной поверхности, формирование $p\text{-}n$ гетероперехода. Различные параметры решетки ZnO и $g\text{-C}_3\text{N}_4$, участвующих в формировании $p\text{-}n$ перехода, приводят к образованию большого количества дефектов между ZnO и $g\text{-C}_3\text{N}_4$, которые являются потенциальными активными центрами. Важную роль в обеспечении улучшения сенсорных свойств играет различные положения уровня Ферми в ZnO и $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Так как уровень Ферми в $g\text{-C}_3\text{N}_4$ расположен выше, чем в ZnO , на границе раздела $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ZnO электроны будут переходить из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в ZnO до тех пор, пока их уровни Ферми не сравняются. Таким образом, когда сенсор композитного состава будет подвергаться

Таблица 1. Основные работы по газовым сенсорам с применением $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Материал	Целевой газ	Условия работы	Отклик	Ист.
$g\text{-C}_3\text{N}_4(8\%)/\text{ZnO}$	Этанол, 104 ppm	КТ, УФ	$\{(I_b - I_a)/I_a\} = 3.26$	[61]
Графен/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (15 %)	NO_2 , 500 ppm	$T = 100^\circ\text{C}$	$R_d/R_g = 2$	[62]
$g\text{-C}_3\text{N}_4(10\%)/\text{TiO}_2$	CO_2 , 1500 ppm	$T = 450^\circ\text{C}$	$R_d/R_g = 0.88$	[63]
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$ (60 %)	Этанол, 100 ppm	$T = 340^\circ\text{C}$	$R_d/R_g = 7.76$	[64]
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Co}_3\text{O}_4$	Толуол, 100 ppm	$T = 220^\circ\text{C}$	$R_g/R_a = 25.8$	[65]
C (10 %)/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$	NO_2 , 50 ppm	$T = 200^\circ\text{C}$	$(R_g - R_a)/R_a = 0.71$	[66]
$g\text{-C}_3\text{N}_4(10\%)/\text{SnO}_2$	Уксусная кислота, 1000 ppm	$T = 185^\circ\text{C}$	$R_d/R_g = 87.7$	[67]
$g\text{-C}_3\text{N}_4(1\%)/\text{WO}_3$	Ацетон, 100 ppm	$T = 340^\circ\text{C}$	$R_d/R_g = 35$	[68]
$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{NiO}$	NO_2 , 50 ppm	КТ	$R_d/R_g = 25.4$	[69]
$\text{ZnO}/g\text{-C}_3\text{N}_4(30\%)$	NO_2 , 10 ppm	$T = 180^\circ\text{C}$	$(R_g - R_a)/R_a = 14.6$	[70]
$g\text{-C}_3\text{N}_4(12\%)/\text{In}_2\text{O}_3$	Формальдегид, 100 ppm	$T = 119^\circ\text{C}$	$R_d/R_g = 1405$	[71]

воздействию CH_4 , электроны, которые были захвачены хемосорбированными анионами кислорода, возвращаются обратно в ZnO . Поступление дополнительных электронов от $\text{g-C}_3\text{N}_4$ приводит к более значительному уменьшению области обедненного заряда. Авторами [73] показано увеличение чувствительности к ацетону при формировании гетероструктур $\text{CuO/g-C}_3\text{N}_4$. Так, отклик композитов, содержащих 4 мас. % $\text{g-C}_3\text{N}_4$ к 1000 ppm ацетона при комнатной температуре почти в 30 раз превышает отклик чистого образца CuO . При этом в качестве причин улучшения свойств указаны те же факторы, перечисленные выше.

Существует ряд исследований, подтверждающих эффективность фотоактивации газовой чувствительности при комнатной температуре в нанокомпозитах «оксид металла / $\text{g-C}_3\text{N}_4$ » благодаря разделению фотогенерированных носителей заряда. Например, это показано при детектировании этанола при воздействии УФ-света сенсорами на основе композита $\text{ZnO/g-C}_3\text{N}_4$ [61], $\text{TiO}_2\text{-C/g-C}_3\text{N}_4$ [74]. Определение присутствия NO_2 при комнатной температуре и воздействии видимого света возможно сенсорами на основе структур 2D/2D $\text{ZnO/g-C}_3\text{N}_4$ [75], $\text{In}_2\text{O}_3\text{/g-C}_3\text{N}_4\text{/Au}$ [76].

Сенсор на основе нанокомпозита графена и $\text{g-C}_3\text{N}_4$ [62] показал свою эффективность при детектировании NO_2 благодаря синергетическому эффекту, при котором графен с высокой подвижностью носителей заряда играет роль канала для передачи сигнала, в то время как $\text{g-C}_3\text{N}_4$ с активной поверхностью принимает участие во взаимодействии с молекулами анализа.

Создание композитов на основе двумерных материалов и оксидов металлов стало важным направлением исследований в области газовых сенсоров.

В работе [77] композиты восстановленного оксида графена (rGO) и ZnO показали чувствительность 25.6 % к 5 ppm NO_2 при комнатной температуре. В то же время отклик rGO начинает наблюдаться только при более высоких концентрациях NO_2 .

Исследованы газочувствительные свойства композитного материала графен/ SnO_2 [78]. При оптимальной рабочей температуре 150 °C значение отклика к 1 ppm NO_2 было равным 24.7, а отклик чистого SnO_2 составлял менее 10.

В работе [79] разработаны газочувствительные композиты ZnO/MoS_2 . Значение отклика полученного сенсора к 50 ppm этанола достигало

42.8 при рабочей температуре 260 °C. Для чистого ZnO оптимальная температура составила 240 °C, а отклик к той же концентрации этанола составил ~ 24.

Полученные в работе [80] композиты $\text{MoS}_2\text{-TiO}_2$ продемонстрировали отличные сенсорные свойства и высокую чувствительность к парам этанола при низких рабочих температурах, причем их отклик был почти в 11 раз выше, чем у нанотрубок TiO_2 . При оптимальной рабочей температуре 150 °C отклик к 100 ppm этанола достигал ~ 14.2.

Анализ современных разработок в области газовых сенсоров показал, что главным недостатком сенсоров на основе оксидов металлов является высокая рабочая температура, а 2D-материалы показывают неудовлетворительную селективность. К эффективным стратегиям для дальнейшего усовершенствования (для повышения селективности, снижения рабочей температуры, улучшения чувствительности и других свойств) относится создание композитных структур. К настоящему времени исследования по созданию оксидов металлов с 2D-материалами все еще находятся на ранней стадии. Необходимо дальнейшее изучение механизмов их взаимодействия с молекулами газов.

6. Заключение

В настоящее время $\text{g-C}_3\text{N}_4$ является материалом с большим потенциалом для применения в газовых сенсорах. В обзоре обобщены структура и основные свойства, такие как электрические и оптические свойства $\text{g-C}_3\text{N}_4$. Рассмотрен механизм работы $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в газовых сенсорах и перечислены конкретные области применения газовых сенсоров.

Отсюда можно сделать следующие выводы о свойствах материала $\text{g-C}_3\text{N}_4$ для применения в газовых сенсорах. Высокая удельная площадь поверхности $\text{g-C}_3\text{N}_4$ обеспечивает большее количество активных центров для взаимодействия с газами и, следовательно, улучшает чувствительность. Поверхностные каталитические свойства $\text{g-C}_3\text{N}_4$ улучшают характеристики сенсора в окислении целевых газов, что в конечном итоге позволяет минимизировать рабочую температуру. Управление мезопористостью $\text{g-C}_3\text{N}_4$ с помощью оптимального размера и объема пор обеспечивает перколяционный путь для диффузии молекул газа, что в свою очередь приводит к увеличению эффективности сенсора. Формирование гетероперехода между $\text{g-C}_3\text{N}_4$ и окси-

дами металла изменяет свойства переноса заряда. Возможность существования оксидов металлов в нескольких фазах (например, $\gamma\text{-WO}_3$ и $\varepsilon\text{-WO}_3$) с $\text{g-C}_3\text{N}_4$ усиливает сенсорный отклик за счет переноса электронов между гомопереходом ($\gamma\text{-WO}_3$ и $\varepsilon\text{-WO}_3$) и гетеропереходом ($\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$). Поскольку металл или оксид металла обладает более высокой работой выхода, чем $\text{g-C}_3\text{N}_4$, электроны переходят из зоны проводимости $\text{g-C}_3\text{N}_4$ к металлу/оксиду металла, что приводит к изгибу зон. Большая площадь поверхности и более высокая электропроводность могут быть достигнуты при использовании композита из 2D-2D материалов (графена и $\text{g-C}_3\text{N}_4$) для эффективного взаимодействия с газами.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

- Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: a review. *Materials Science and Engineering: B*. 2018;229: 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Yamazoe N. Oxide semiconductor gas sensors. *Catalysis Surveys from Asia*. 2003;7(1): 63–75. <https://doi.org/10.1023/a:1023436725457>
- Nikolić M. V., Milovanović V, Vasiljević Z. Ž., Stamenković Z. Semiconductor gas sensors: materials, technology, design, and application. *Sensors*. 2020;20(22): 6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>
- Рябко А. А., Бобков А. А., Налимова С. С., ... Теруков Е. И. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации. *Журнал технической физики*. 2022;92(5): 758764. <https://doi.org/10.21883/jtf.2022.05.52382.314-21>
- Li Q., Zeng W., Li Y. Metal oxide gas sensors for detecting NO_2 in industrial exhaust gas: recent developments. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022;359: 131579. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131579>
- Rabchinskii M. K., Sysoev V. V., Varezhnikov A. S., ... Brunkov P. N. Toward on-chip multisensor arrays for selective methanol and ethanol detection at room temperature: capitalizing the graphene carbonylation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023;15(23): 28370–28386. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c02833>
- Рябцев С. В., Обвинцева Н. Ю., Чистяков В. В., ... Домашевская Э. П. Особенности резистивного отклика на озон полупроводниковых сенсоров PdO , работающих в режиме термомодуляции. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(3): 392–397. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11263>
- Шапошник А. В., Звягин А. А., Дьяконова О. В., Рябцев С. В., Гхарид Д. А. А. Полупроводниковый металлоксидный сенсор сероводорода, работающий в нестационарном температурном режиме. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 637–643. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3684>
- Рябко А. А., Налимова С. С., Мазинг Д. С., ... Аleshin A. N. Сенсибилизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками AgInS_2 для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией. *Журнал технической физики*. 2022;92(6): 845–851. <https://doi.org/10.21883/jtf.2022.06.52514.15-22>
- Nalimova S. S., Ryabko A. A., Maximov A. I., Moshnikov V. A. Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1697(1): 012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012128>
- Domènech-Gil G., Samà J., Fàbrega C., ... Romano-Rodríguez A. Highly sensitive SnO_2 nanowire network gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2023;383: 133545. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133545>
- Pham Q. T., Syrkov A. G., Silivanov M. O., Ngo Q. K. Preparation of zinc nanooxide and its application for antibacterial coatings. *Tsvetnye Metally*. 2023;(9): 51–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.09.06>
- Rzaij J. M., Abass A. M. Review on: TiO_2 thin film as a metal oxide gas sensor. *Journal of Chemical Reviews*. 2020;2(2): 114–121. <https://doi.org/10.33945/sami.jcr.2020.2.4>
- Umar A., Alduraibi M., Al-Dossary O. M. Development of ethanol gas sensor using $\text{A-Fe}_2\text{O}_3$ nanocubes synthesized by hydrothermal process. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2020;15(1): 59–64. <https://doi.org/10.1166/jno.2020.2742>
- Dong C., Zhao R., Yao L., Yan R., Zhang X., Wang Y. A review on WO_3 based gas sensors: morphology control and enhanced sensing properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;820: 153194. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153194>
- Chaloepote G., Prathumwan R., Subannajui K., Wisitsoraat A., Wongchoosuk C. 3D printed CuO semiconducting gas sensor for ammonia detection at room temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2021;123: 105546. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105546>
- Kushchenko A. N., Syrkov A. G., Ngo Q. K. Inorganic synthesis of highly hydrophobic metals containing surface compounds with electron acceptor modifiers: process features. *Tsvetnye Metally*. 2023;(8): 62–72. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.08.11>
- Kumarage G. W. C., Comini E. Low-dimensional nanostructures based on cobalt oxide (Co_3O_4) in chemical-gas sensing. *Chemosensors*. 2021;9(8): 197. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9080197>
- Chumakova V., Marikutsa A., Platonov V., Khmelevsky N., Rumyantseva M. N. Distinct roles of additives in the improved sensitivity to CO of Ag- and Pd-modified nanosized LaFeO_3 . *Chemosensors*. 2023;11(1): 60. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11010060>
- Njoroge M. A., Kirimi N. M., Kuria K. P. Spinel ferrites gas sensors: a review of sensing parameters, mechanism and

- the effects of ion substitution. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences.* 2021;47(6): 807–836. <https://doi.org/10.1080/10408436.2021.1935213>
21. An D., Wang, Q., Tong, X., ... Li Y. Synthesis of Zn_2SnO_4 via a co-precipitation method and its gas-sensing property toward ethanol. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2015;213: 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.02.042>
 22. Buckley D. J., Black N. C. G., Castanon E., Melios C., Hardman M., Kazakova O. Frontiers of graphene and 2D material-based gas sensors for environmental monitoring. *2D Materials.* 2020;7(3): 032002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab7bc5>
 23. Platonov V., Malinin N. I., Vasiliev R. B., Rumyantseva M. N. Room temperature UV-activated NO_2 and NO detection by ZnO/rGO composites. *Chemosensors.* 2023;11(4): 227. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11040227>
 24. Simonenko E. P., Simonenko E. P., Mokrushin A. S., ... Kuznetsov N. T. Application of titanium carbide MXENES in chemiresistive gas sensors. *Nanomaterials.* 2023;13(5): 850. <https://doi.org/10.3390/nano13050850>
 25. Cui S., Li R., Pei J., Wen, Y., Li Y., Xing X. Automobile exhaust purification over $g-C_3N_4$ catalyst material. *Materials Chemistry and Physics.* 2020;247: 122867. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122867>
 26. Ray D., Nepak D., Vinodkumar T., Subrahmanyam Ch. $g-C_3N_4$ promoted DBD plasma assisted dry reforming of methane. *Energy.* 2019;183: 630–638. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.147>
 27. Yang W., Jia L., Wu P., Zhai H., He J., Liu C. Effect of thermal program on structure–activity relationship of $g-C_3N_4$ prepared by urea pyrolysis and its application for controllable production of $g-C_3N_4$. *Journal of Solid State Chemistry.* 2021;304: 122545. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122545>
 28. Pati S., Acharya R. An overview on $g-C_3N_4$ as a robust photocatalyst towards the sustainable generation of H_2 energy. *Materials Today: Proceedings.* 2021;35: 175–178. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.178>
 29. Xiong Z., Wang Z., Murugananthan M., Zhang Y. Construction of an in-situ Fenton-like system based on a $g-C_3N_4$ composite photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials.* 2019;373: 565–571. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.114>
 30. Cao M., Wang K., Tudela I., Fan X. Improve photocatalytic performance of $g-C_3N_4$ through balancing the interstitial and substitutional chlorine doping. *Applied Surface Science.* 2021;536: 147784. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147784>
 31. Zhao R., Wang Z., Zou T., Wang Z., Yang Y., Xing X. Synthesis and enhanced sensing performance of $g-C_3N_4/SnO_2$ composites toward isopropanol. *Chemistry Letters.* 2018;47(7): 881–882. <https://doi.org/10.1246/cl.180296>
 32. Cao J., Qin C., Wang Y., Zhang H., Sun G., Zhang Z. Solid-state method synthesis of SnO_2 -decorated $g-C_3N_4$ nanocomposites with enhanced gas-sensing property to ethanol. *Materials.* 2017;10(6): 604. <https://doi.org/10.3390/ma10060604>
 33. Li X., Li Y., Sun G., Luo N., Zhang B., Zhang Z. Synthesis of a flower-like $g-C_3N_4/ZnO$ hierarchical structure with improved CH_4 sensing properties. *Nanomaterials.* 2019;9(5): 724. <https://doi.org/10.3390/nano9050724>
 34. He F., Wang Z., Li Y., Peng S., Liu B. The nonmetal modulation of composition and morphology of $g-C_3N_4$ -based photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2020;269: 118828. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118828>
 35. Zhao G., Yang H., Liu M., Xu X. Metal-free graphitic carbon nitride photocatalyst goes into two-dimensional time. *Frontiers in Chemistry.* 2018;6. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00551>
 36. Zhang Y., Gao H., Kuai Y., ... You W. Effects of Y additions on the precipitation and recrystallization of Al-Zr alloys. *Materials Characterization.* 2013;86: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.09.004>
 37. Naseri A., Samadi M., Pourjavadi A., Ramakrishna S. Graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$)-based photocatalysts for solar hydrogen generation: recent advances and future development directions. *Journal of Materials Chemistry A.* 2017;5(45): 23406–23433. <https://doi.org/10.1039/c7ta05131j>
 38. Idris A. O., Oseghe E. O., Msagati T. A. M., Kuveraga A. T., Feleni U., Mamba B. B. Graphitic carbon nitride: a highly electroactive nanomaterial for environmental and clinical sensing. *Sensors.* 2020;20(20): 5743. <https://doi.org/10.3390/s20205743>
 39. Patra P. C., Mohapatra Y. N. Dielectric constant of thin film graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) and double dielectric $Al_2O_3/g-C_3N_4$. *Applied Physics Letters.* 2021;118(10). <https://doi.org/10.1063/5.0045911>
 40. Giusto P., Cruz D., Heil T., ... Antonietti M. Shine bright like a diamond: new light on an old polymeric semiconductor. *Advanced Materials.* 2020;32(10). <https://doi.org/10.1002/adma.201908140>
 41. Bian J., Li Q., Huang C., Li J., Gou Y., Zaw M., Qi F. Thermal vapor condensation of uniform graphitic carbon nitride films with remarkable photocurrent density for photoelectrochemical applications. *Nano Energy.* 2015;15: 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.04.012>
 42. Wang Y., Wang X., Antonietti M. Polymeric graphitic carbon nitride as a heterogeneous organocatalyst: from photochemistry to multipurpose catalysis to sustainable chemistry. *Angewandte Chemie International Edition.* 2011;51(1): 68–89. <https://doi.org/10.1002/anie.201101182>
 43. Cao S., Low J., Wang Y., Jaroniec M. Polymeric photocatalysts based on graphitic carbon nitride. *Advanced Materials.* 2015;27(13): 2150–2176. <https://doi.org/10.1002/adma.201500033>
 44. Liu M., Wageh S., Al-Ghamdi A. A., ... Wang Y. Quenching induced hierarchical 3D porous $g-C_3N_4$ with enhanced photocatalytic CO_2 reduction activity. *Chemical Communications.* 2019;55(93): 14023–14026. <https://doi.org/10.1039/c9cc07647f>
 45. Li C., Sun Z., Xue Y., Yao G., Zheng S. A facile synthesis of $g-C_3N_4/TiO_2$ hybrid photocatalysts by sol–gel method and its enhanced photodegradation towards methylene blue under visible light. *Advanced Powder Technology.* 2016;27(2): 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.01.003>
 46. Yuan X., Zhou C., Jing Q., Tang Q., Mu Y., Du A. K. Facile synthesis of $g-C_3N_4$ nanosheets/ ZnO nanocomposites with enhanced photocatalytic activity in reduction of aqueous chromium (VI) under visible light. *Nanomaterials.* 2016;6(9): 173. <https://doi.org/10.3390/nano6090173>

47. Cheng F., Yin H., Xiang Q. Low-temperature solid-state preparation of ternary CdS/g-C₃N₄/CuS nanocomposites for enhanced visible-light photocatalytic H₂-production activity. *Applied Surface Science*. 2017;391: 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.169>
48. Ge L., Han C., Liu J. Novel visible light-induced g-C₃N₄/Bi₂WO₆ composite photocatalysts for efficient degradation of methyl orange. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2011;108–109: 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.08.014>
49. Liang Q., Zhang M., Yao C., Liu C., Xu S., Li Z. High performance visible-light driven photocatalysts of Bi₂MoO₆-g-C₃N₄ with controllable solvothermal fabrication. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2017;332: 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.09.012>
50. Cao S., Liu X., Yuan Y., ... Xue C. Solar-to-fuels conversion over In₂O₃/g-C₃N₄ hybrid photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2014;147: 940–946. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.10.029>
51. Liu L., Qi Y., Lu J., ... Cui W. A stable Ag₃PO₄@g-C₃N₄ hybrid core@shell composite with enhanced visible light photocatalytic degradation. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2016;183: 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.10.035>
52. Yang Y., Guo W., Guo Y., Zhao Y., Yuan X., Guo Y. Fabrication of Z-scheme plasmonic photocatalyst Ag@AgBr/g-C₃N₄ with enhanced visible-light photocatalytic activity. *Journal of Hazardous Materials*. 2014;271: 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.023>
53. Peng W., Li X. Synthesis of MoS₂/g-C₃N₄ as a solar light-responsive photocatalyst for organic degradation. *Catalysis Communications*. 2014;49: 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2014.02.008>
54. Bhati V. S., Hojamberdiev M., Kumar M. Enhanced sensing performance of ZnO nanostructures-based gas sensors: A review. *Energy Reports*. 2020;6: 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.070>
55. Idrees F., Dillert R., Bahnemann D. W., Butt F. K., Tahir M. N. In-situ synthesis of Nb₂O₅/g-C₃N₄ heterostructures as highly efficient photocatalysts for molecular H₂ evolution under solar illumination. *Catalysts*. 2019;9(2): 169. <https://doi.org/10.3390/catal9020169>
56. Yin H., Yamamoto T., Wada Y., Yanagida S. Large-scale and size-controlled synthesis of silver nanoparticles under microwave irradiation. *Materials Chemistry and Physics*. 2004;83(1): 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2003.09.006>
57. Li T., Zhao L., He Y., Cai J., Luo M., Lin J. Synthesis of g-C₃N₄/SmVO₄ composite photocatalyst with improved visible light photocatalytic activities in RhB degradation. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2013;129: 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.09.031>
58. Bhati V. S., Takhar V., Raliya R., Kumar M., Banerjee R. Recent advances in g-C₃N₄ based gas sensors for the detection of toxic and flammable gases: a review. *Nano Express*. 2022;3(1): 014003. <https://doi.org/10.1088/2632-959x/ac477b>
59. Li S., Wang Z., Wang X., ... Huang W. Orientation controlled preparation of nanoporous carbon nitride fibers and related composite for gas sensing under ambient conditions. *Nano Research*. 2017;10(5): 1710–1719. <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1423-8>
60. Wang D., Gu W., Zhang Y., Hu Y., Zhang T., Tao X., Chen W. Novel C-rich carbon nitride for room temperature NO₂ gas sensors. *RSC Advances*. 2014;4(35): 18003–18006. <https://doi.org/10.1039/c4ra02127d>
61. Zhai J., Wang T., Wang C., Liu D. UV-light-assisted ethanol sensing characteristics of g-C₃N₄/ZnO composites at room temperature. *Applied Surface Science*. 2018;441: 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.026>
62. Hang N. T., Zhang S. Efficient exfoliation of g-C₃N₄ and NO₂ sensing behavior of graphene/g-C₃N₄ nanocomposite. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017;248: 940–948. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.199>
63. Karthik P., Gowthaman P., Venkatachalam M., Saroja M. Design and fabrication of g-C₃N₄ nanosheets decorated TiO₂ hybrid sensor films for improved performance towards CO₂ gas. *Inorganic Chemistry Communications*. 2020;119: 108060. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108060>
64. Zhang Y., Zhang D., Guo W., Chen S. The α-Fe₂O₃/g-C₃N₄ heterostructural nanocomposites with enhanced ethanol gas sensing performance. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;685: 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.220>
65. Yue J., Xu J., Hong B., ... Wang X. Synthesis and calcination-temperature-dependent gas-sensing performance of g-C₃N₄/Co₃O₄ heterojunctions for toluene gas sensors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023;34(21). <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10957-y>
66. Govind A., Bharathi P., Mathankumar G., ... Navaneethan M. Enhanced charge transfer in 2D carbon-rich g-C₃N₄ nanosheets for highly sensitive NO₂ gas sensor applications. *Diamond and Related Materials*. 2022;128: 109205. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109205>
67. Zhang Y., Liu J., Chu X., Liang S., Kong L. Preparation of g-C₃N₄-SnO₂ composites for application as acetic acid sensor. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;832: 153355. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153355>
68. Wang D., Huang S., Li H., ... Yang J. Ultrathin WO₃ nanosheets modified by g-C₃N₄ for highly efficient acetone vapor detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019;282: 961–971. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.138>
69. Ullah M., He L., Liu Z., ... Shi K. Rational fabrication of a g-C₃N₄/NiO hierarchical nanocomposite with a large surface area for the effective detection of NO₂ gas at room temperature. *Applied Surface Science*. 2021;550: 149368. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149368>
70. Patrick D. S., Govind A., Bharathi P., ... Navaneethan M. Hierarchical ZnO/g-C₃N₄ nanocomposites for enhanced NO₂ gas sensing applications. *Applied Surface Science*. 2023;609: 155337. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155337>
71. Sun D., Wang W., Zhang N., ... Ruan S. g-C₃N₄/In₂O₃ composite for effective formaldehyde detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022;358: 131414. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131414>
72. Meng F., Chang Y., Qin W., ... Ibrahim M. ZnO-reduced graphene oxide composites sensitized with graphitic carbon nitride nanosheets for ethanol sensing. *ACS Applied Nano Materials*. 2019;2(5): 2734–2742. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b00257>
73. Akhtar A., Cheng J., Chu X., Liang S., Dong Y., He L. Acetone sensing properties of the g-C₃N₄-CuO nanocomposites prepared by hydrothermal method.

Materials Chemistry and Physics. 2021;265: 124375. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124375>

74. Hou M., Gao J., Yang L., Guo S., Hu T., Li Y. Room temperature gas sensing under UV light irradiation for $Ti_3C_2T_x$ MXene derived lamellar TiO_2 -C/g-C₃N₄ composites. *Applied Surface Science.* 2021;535: 147666. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147666>

75. Wang H., Bai J., Meng D., ... Lu G. Visible light activated excellent NO₂ sensing based on 2D/2D ZnO/g-C₃N₄ heterojunction composites. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2020;304: 127287. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127287>

76. Han C., Li X., Liu J., ... Liu Y. In₂O₃/g-C₃N₄/Au ternary heterojunction-integrated surface plasmonic and charge-separated effects for room-temperature ultrasensitive NO₂ detection. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2022;371: 132448. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132448>

77. Liu S., Yu B., Zhang H., Fei T., Zhang T. Enhancing NO₂ gas sensing performances at room temperature based on reduced graphene oxide-ZnO nanoparticles hybrids. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2014;202: 272. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.05.086>

78. Kim H. W., Na H. G., Kwon Y. J., ... Kim S. S. Microwave-assisted synthesis of graphene–SnO₂ nanocomposites and their applications in gas sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017;9(37): 31667. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b02533>

79. Yan H., Song P., Zhang S., Yang Z., Wang Q. Facile synthesis, characterization and gas sensing performance of ZnO nanoparticles-coated MoS₂ nanosheets. *Journal of Alloys*

and Compounds. 2016;662: 118. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.066>

80. Zhao P. X., Tang Y., Mao J., ... Zhang X. M. One-dimensional MoS₂-decorated TiO₂ nanotube gas sensors for efficient alcohol sensing. *Journal of Alloys and Compounds.* 2016;674: 252. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.03.029>

Информация об авторах

Буй Конг Доан, аспирант кафедры микро- и наноэлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт Петербург, Российская Федерация).

Налимова Светлана Сергеевна, к. ф.-м. н., доцент кафедры микро- и наноэлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3065-3961>
sskarpova@list.ru

Нгуен Ван Ту Ань, аспирант кафедры «физическая электроника», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0004-7198-6329>
anh.spbpu@gmail.com

Поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 10.07.2024; принята к публикации 15.07.2024; опубликована онлайн 25.06.2025.