

## 08 Сенсибилизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками AgInS<sub>2</sub> для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией

© А.А. Рябко,<sup>1,2</sup> С.С. Налимова,<sup>1</sup> Д.С. Мазинг,<sup>1</sup> О.А. Корепанов,<sup>1</sup> А.М. Гукетлов,<sup>3</sup>  
О.А. Александрова,<sup>1</sup> А.И. Максимов,<sup>1</sup> В.А. Мошников,<sup>1</sup> З.В. Шомахов,<sup>3</sup> А.Н. Алешин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Нальчик, Россия  
e-mail: a.a.ryabko93@yandex.ru a

Поступило в Редакцию 21 января 2022 г.

В окончательной редакции 13 марта 2022 г.

Принято к публикации 14 марта 2022 г.

Представлена низкотемпературная методика формирования покрытий из наностержней ZnO, декорированных коллоидными квантовыми точками AgInS<sub>2</sub>. Показано, что нанокристаллы ZnO и коллоидные квантовые точки AgInS<sub>2</sub> с оболочкой из молекул меркаптопропионовой кислоты формируют гетеропереход. Сенсибилизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками AgInS<sub>2</sub> к видимому облучению обеспечивает газоаналитический отклик структуры к парам изопропилового спирта при комнатной температуре в условиях освещения синим светодиодом с пиковой длиной волны 460 nm.

**Ключевые слова:** адсорбционные газовые сенсоры, фотоактивация газочувствительности, наностержни оксида цинка, коллоидные квантовые точки AgInS<sub>2</sub>, сенсибилизация.

DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52514.15-22

### Введение

Принцип работы адсорбционных газовых сенсоров (хеморезистивных газовых сенсоров) основан на изменении электрического сопротивления чувствительного материала в результате химической реакции с газом реагентом на его поверхности. В качестве чувствительных материалов для адсорбционных сенсоров используется широкий класс материалов, включающий оксиды металлов [1–6], нитриды [7–10] и сульфиды [11,12], углеродные наноматериалы [13–16], проводящие полимеры [17–19], 2D-материалы [20,21] и др. Тем не менее именно оксиды металлов, их соединения и композиции наиболее интенсивно исследуются и применяются на практике в адсорбционных газовых сенсорах. Несмотря на то что адсорбционные газовые сенсоры имеют много преимуществ, такие как высокая чувствительность, возможность миниатюризации сенсорного элемента и низкая себестоимость, их широкое применение в портативных устройствах ограничено высокими рабочими температурами (200–500°C). Функционирование сенсорного элемента при высоких температурах сопряжено с такими проблемами, как высокое энергопотребление, необходимость отвода тепла, уменьшение срока службы сенсорного элемента, а также риски при работе во взрывоопасной атмосфере [22]. Для решения обозначенных проблем в настоящее время разрабатываются

адсорбционные газовые сенсоры на основе оксидов металлов, функционирующие при более низкой, комнатной температуре [23–27].

Для активации газочувствительности слоев из наноструктурированных оксидов металлов при комнатной температуре вместо нагрева используют оптическую генерацию свободных носителей заряда. Большинство используемых оксидов металлов являются широкозонными, а их облучение производят в ультрафиолетовом диапазоне [28–33]. Чтобы расширить диапазон поглощения света для фотоактивации газочувствительности в длинноволновую область, проводится большое число исследований по декорированию оксидов металлов более узкозонными полупроводниками, например CdSe [34], CdS [35], PbS [36,37], g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [38], rGO [39].

Настоящая работа направлена на исследование декорирования наностержней (НС) оксида цинка коллоидными квантовыми точками (ККТ) AgInS<sub>2</sub> для применения в адсорбционных газовых сенсорах с оптической активацией. НС оксида цинка рассматриваются как биосовместимый материал с низкой токсичностью [40,41]. В свою очередь, ККТ AgInS<sub>2</sub> также не содержат в своем составе тяжелых металлов, являются менее токсичным аналогом бинарных халькогенидов. Коллоидные точки AgInS<sub>2</sub> являются объектом исследований для применения в качестве меток биологических маркеров [42], а так-

же для сенсбилизации фотокатализаторов к видимому свету [43,44].

В настоящей работе НС оксида цинка и ККТ  $\text{AgInS}_2$  синтезированы в водной среде при относительно невысоких температурах. Такой подход обеспечивает экологическую безопасность и снижает энергозатратность технологических процессов создания газочувствительного покрытия на основе НС оксида цинка и ККТ  $\text{AgInS}_2$  для адсорбционных газовых сенсоров с оптической активацией. Установлено, что нанокристаллы оксида цинка и ККТ  $\text{AgInS}_2$  формируют гетеропереход. Декорирование НС оксида цинка квантовыми точками  $\text{AgInS}_2$  увеличивает фотопроводимость НС в видимом диапазоне, что обеспечивает газочувствительность НС  $\text{ZnO}$  к парам изопропилового спирта при комнатной температуре в условиях облучения синим светом.

## 1. Материалы и методы исследования

Синтез покрытий из НС  $\text{ZnO}$  производился на различных подложках и состоял из двух стадий: нанесение зародышевого слоя методом ультразвукового спрей-пиролиза и выращивание НС мягким гидротермальным методом [45]. После синтеза НС  $\text{ZnO}$  образцы отжигались при температуре  $500^\circ\text{C}$  в течение 10 min. Для анализа образцов с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии синтез осуществлялся на кремниевых подложках, для регистрации фотовольтаического эффекта — на стеклянных подложках с FTO (оксид олова, легированный фтором) покрытием. Для регистрации фотоотклика и газочувствительности образцы синтезировались на керамических подложках со встречно-штыревыми электродами ( $\text{NiCr}/\text{Ni}/\text{Au}$ ). Ширина электродов и расстояние между ними составляли  $25\ \mu\text{m}$ .

Синтез ККТ  $\text{AgInS}_2$ , стабилизированных меркаптопропионой кислотой, производился по методике, основанной на данных работы [46]. Выбор меркаптопропионой кислоты в качестве лигандов-стабилизаторов обусловлен относительно небольшой длиной молекулы, что обеспечивает возможность транспорта свободных носителей заряда как между ККТ, так и от ККТ к НС [47]. Для синтеза коллоидного раствора в 5 ml дистиллированной воды были растворены 0.1 mmol  $\text{AgNO}_3$  и 2 mmol меркаптопропионой кислоты. В полученный раствор добавлялись  $50\ \mu\text{l}$  25% водного раствора  $\text{NH}_4\text{OH}$  и водный раствор 0.7 mmol  $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ . Быстрая инъекция 1 mmol  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  в катионный прекурсорный раствор приводила к мгновенной нуклеации. Рост частиц осуществлялся в течение 30 min при температуре  $95\text{--}100^\circ\text{C}$ . Характеризация типичных образцов синтезируемых ККТ представлена в работах [48,49]. Полученный раствор ККТ  $\text{AgInS}_2$  очищался при помощи добавления изопропилового спирта в качестве осадителя с последующим центрифугированием. После двух циклов

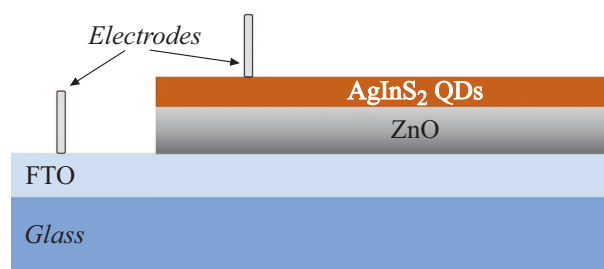


Рис. 1. Структура на основе оксида цинка и ККТ для регистрации фотовольтаического эффекта.

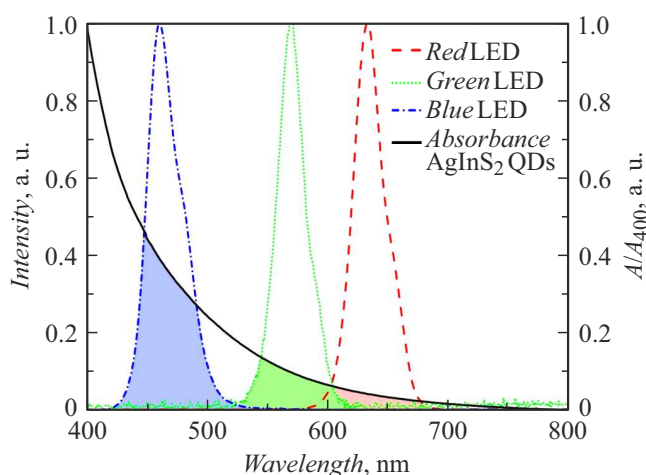
очистки ККТ диспергировались в 1 ml дистиллированной воды.

Чтобы зарегистрировать формирование гетероструктуры между оксидом цинка и ККТ  $\text{AgInS}_2$ , и, следовательно, возможность разделения свободных носителей заряда на их границе, была сформирована структура на основе тонкого слоя  $\text{ZnO}$ , полученного спрей-пиролизом, и ККТ (рис. 1), измерена ее вольт-амперная кривая, ток короткого замыкания и напряжение холостого хода при освещении.

Нанесение ККТ  $\text{AgInS}_2$  осуществлялось путем центрифугирования (2000 rpm) с последующим нагревом ( $\sim 80^\circ\text{C}$ ). Электрод на слое ККТ был сформирован углеродной пастой (SPI), а электрод на FTO-слое был выполнен серебряной пастой (SPI). Для аналогичной структуры с использованием НС оксида цинка регистрировался ток короткого замыкания при освещении. В качестве электродов применялись прижимные золотые контакты. Для исследования фотоотклика и газочувствительности сенсбилизированных НС был выбран способ нанесения равномерного покрытия из индивидуальных частиц на НС, не закрывающих поверхность оксида цинка, который заключался в погружении образцов в золь квантовых точек  $\text{AgInS}_2$  на 15 h. Затем образцы были высушены на воздухе при комнатной температуре. Непосредственно перед измерениями фотоотклика и газочувствительности производилась сушка при температуре  $120^\circ\text{C}$  в течение 30 min.

Химический состав поверхности НС оксида цинка до и после сенсбилизации ККТ  $\text{AgInS}_2$  был проанализирован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (K-Alpha, Thermo Scientific). Обзорные спектры, позволяющие определить все присутствующие в образцах элементы, были получены в диапазоне энергий связи от 0 до  $1350\ \text{eV}$  с использованием рентгеновского излучения  $\text{AlK}\alpha$  с энергией фотона  $1486.6\ \text{eV}$ . Заряд поверхности корректировался по положению пика  $\text{C1s}$  на энергии связи  $284.6\ \text{eV}$  [50].

Анализ фотоотклика и газочувствительности НС оксида цинка к парам изопропилового спирта до и после сенсбилизации спирта производился в измерительной ячейке с возможностью освещения образца светодиодами. Среди стандартных цветных светодиодов в качестве



**Рис. 2.** Спектры люминесценции светодиодов и спектр поглощения (оптической плотности) ККТ AgInS<sub>2</sub>.

источника облучения был выбран синий светодиод с пиковой длиной волны 460 nm (с потребляемой мощностью 70 mW) из-за наибольшего перекрытия спектра люминесценции со спектром поглощения коллоидных квантовых точек AgInS<sub>2</sub> (рис. 2).

Ток через образец измеряли с помощью пикоамперметра Keithley 6485 при напряжении 5 V. Концентрация паров изопропилового спирта 1000 ppm контролировалась скоростями потоков газа-носителя (осушенный воздух) и изопропилового спирта, подробное описание представлено в работе [51].

## 2. Результаты и обсуждение

Вольт-амперная кривая (рис. 3), измеренная для сформированной структуры FTO/ZnO/ККТ AgInS<sub>2</sub>, обладает нелинейностью, а ток через структуру при приложении положительного напряжения превышает ток в обратном направлении. При облучении структуры ксеноновой лампой с блокирующим ультрафиолетовое излучение светофильтром значение напряжения холостого хода составляло единицы mV, значение тока короткого составляло десятки nA. Вольт-амперная характеристика структуры без ККТ линейна.

Регистрация напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при освещении, а также выпрямляющий характер вольт-амперной кривой структуры FTO/ZnO/ККТ AgInS<sub>2</sub> указывает на формирование гетероструктуры ZnO/ККТ AgInS<sub>2</sub> и разделение фотовозбужденных носителей заряда. Незначительное напряжение холостого хода и высокие значения обратного тока могут быть обусловлены как малой разницей в работах выхода полукристаллического слоя ZnO и слоя из ККТ AgInS<sub>2</sub>, так и значительной концентрацией ловушечных состояний у поверхности ККТ и интерфейсе между слоями [52]. На характеристики значительно влияет также материал анода, интерфейс между анодом и слоем ККТ [47,53].

Регистрация тока короткого замыкания при освещении структуры с покрытием из НС ZnO (рис. 4) также указывает на формирование гетероперехода на интерфейсе НС ZnO /ККТ AgInS<sub>2</sub>.

Таким образом, можно утверждать, что НС оксида цинка и слой из ККТ AgInS<sub>2</sub> с оболочкой из меркаптопропионовой кислоты образуют гетеропереход, обеспечивающий разделение фотовозбужденных носителей заряда. Следовательно, декорирование НС ZnO ККТ AgInS<sub>2</sub> может обеспечить сенсибилизацию НС оксида цинка к облучению в видимой (> 380 nm) области спектра.

Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) покрытия из НС ZnO представлены на рис. 5, а. На поверхности образца наблюдаются пики, соответствующие цинку, кислороду и углероду. Обзорный рентгеновский фотоэлектронный спектр НС оксида цинка, модифицированных ККТ AgInS<sub>2</sub> с помощью погружения, представлен на рис. 5, b.

Результат анализа поверхности модифицированных ККТ НС свидетельствует о наличии цинка, кислорода, углерода, индия и серебра. Интенсивность пика серы сопоставима с фоновым шумом на спектре, таким образом, однозначный вывод о наличии на поверхности серы из данных РФЭС сделать невозможно. Пики Ag<sub>3d</sub><sub>5/2</sub> и Ag<sub>3d</sub><sub>3/2</sub> наблюдаются при энергиях связи 373.6 и 367.6 eV, что соответствует катионам Ag<sup>+</sup> в соединении AgInS<sub>2</sub>. Пик In<sub>3d</sub><sub>5/2</sub> расположен на энергии связи 452.6 eV, а пик In<sub>3d</sub><sub>3/2</sub> — на 445.1 eV. Положения пиков отличаются на 7.5 eV, что соответствует катионам In<sup>3+</sup> в кристаллической структуре [54,55]. Таким образом, из обзорных РФЭС спектров можно сделать вывод, что ККТ AgInS<sub>2</sub> адсорбировались на поверхности НС оксида цинка, при этом часть поверхности НС ZnO остается открытой.

При сравнении обзорных спектров наблюдается также значительный рост интенсивности пиков, которые соответствуют кислороду и углероду. Обнаружено также, что до декорирования спектр остоного уровня O1s состоял из пиков, соответствующих кислороду в заряженном состоянии O<sup>2-</sup> (530.6 eV), т.е. кислороду в кристаллической решетке ZnO и кислороду, входящему в состав OH<sup>-</sup> групп (531.7 eV) [56]. Однако после декорирования ККТ AgInS<sub>2</sub> спектр O1s содержал один пик, соответствующий энергии связи 531.3 eV. Изменение спектра O1s указывает на то, что увеличение интенсивности пиков кислорода и углерода обусловлено наличием молекул меркаптопропионовой кислоты (HSCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>H) на поверхности образца.

Фотоотклик на облучение синим светодиодом покрытия из НС до и после декорирования ККТ AgInS<sub>2</sub> представлен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, НС оксида цинка обладают фотопроводимостью при видимом облучении без декорирования ККТ AgInS<sub>2</sub>, что обусловлено дефектными уровнями внутри запрещенной зоны оксида цинка ( $E_g \approx 3.3$  eV) [45]. Тем не менее декорирование НС ККТ

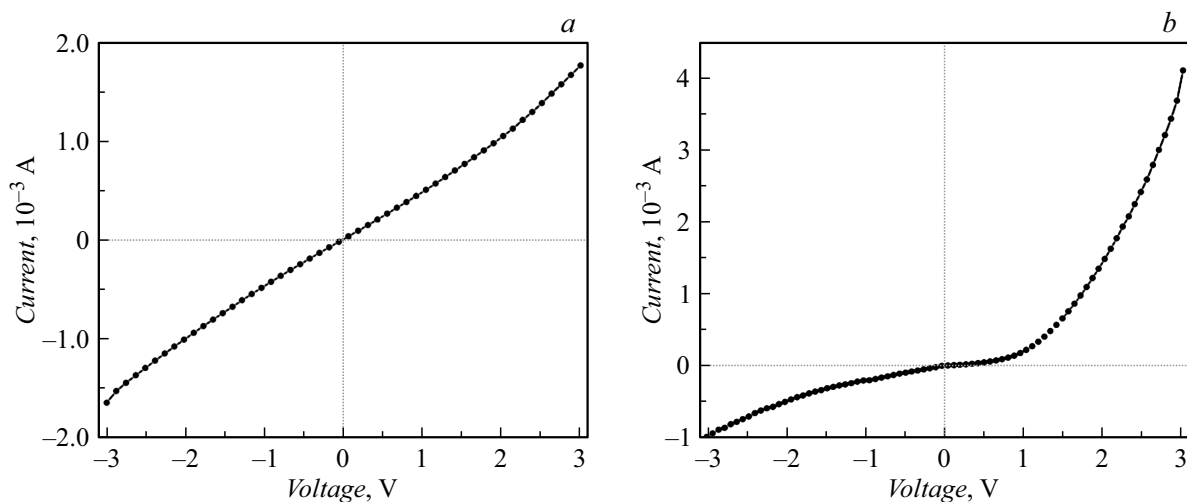


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структур: *a* — FTO/ZnO, *b* — FTO/ZnO/ KKT AgInS<sub>2</sub>. Площадь электродов к структурам в измерениях различалась.

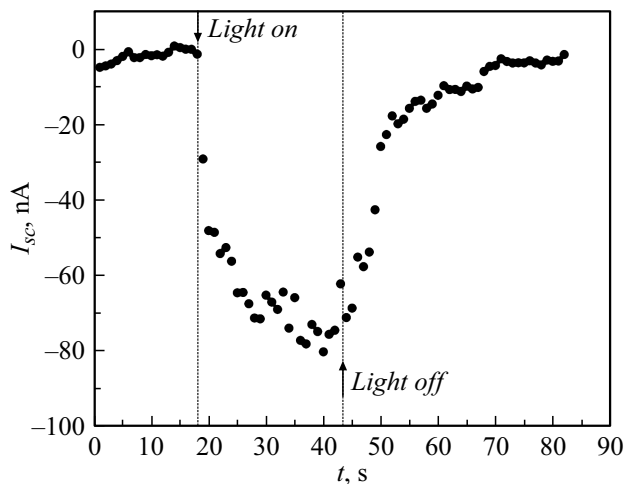


Рис. 4. Регистрация тока короткого замыкания FTO/HC ZnO/KKT AgInS<sub>2</sub> при облучении.

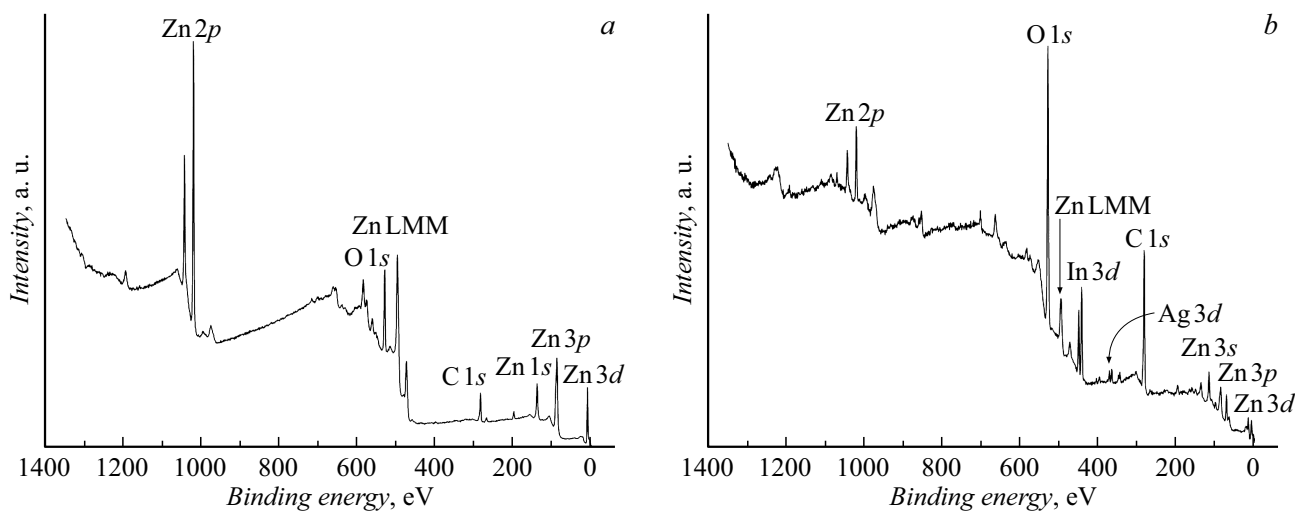
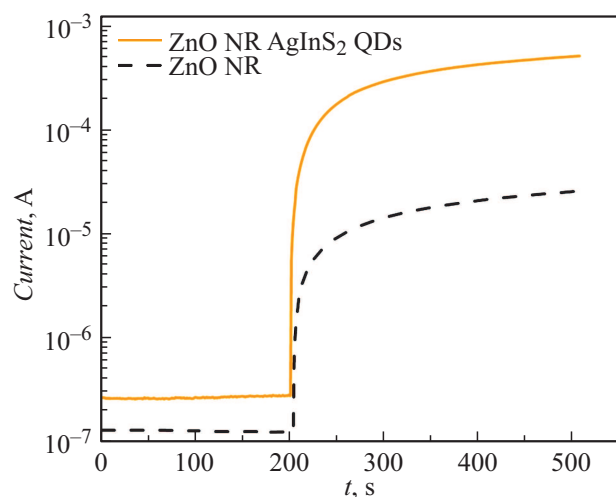
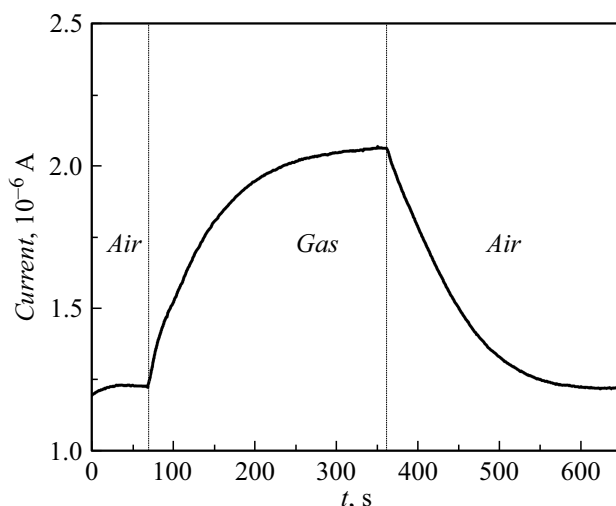


Рис. 5. Рентгеновские фотоэлектронные спектры HC ZnO (*a*) и HC ZnO, декорированных KKT (*b*).



**Рис. 6.** Ток через покрытие из НС ZnO до и после декорирования ККТ AgInS<sub>2</sub> при облучении синим светодиодом (460 nm). Облучение производится с 200 с.

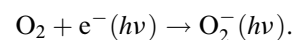


**Рис. 7.** Временная зависимость протекающего через покрытие из НС ZnO, сенсибилизированных коллоидными точками AgInS<sub>2</sub>, тока при воздействии паров изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm.

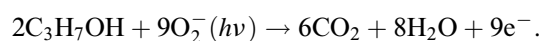
AgInS<sub>2</sub> приводит к увеличению фотоотклика ( $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$ ) приблизительно в 10 раз. Газоаналитический отклик НС к парам изопропилового спирта (при концентрациях до 3000 ppm) без декорирования ККТ AgInS<sub>2</sub> при облучении синим светодиодом отсутствовал. Декорирование НС ZnO ККТ AgInS<sub>2</sub> обеспечивает отклик покрытия на пары изопропилового спирта при облучении синим светодиодом при комнатной температуре (рис. 7).

Значение газоаналитического отклика ( $I_{\text{gas}}/I_{\text{air}}$ ) сенсибилизированных наностержней ZnO на пары изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm составило 1.7. В отсутствие освещения отклик на пары изопропилового спирта зафиксирован не был. В процессе облучения сенсибилизированных НС фотогенерированные носители

заряда (преимущественно в ККТ AgInS<sub>2</sub>) разделяются на границе гетероперехода ZnO/AgInS<sub>2</sub>, время жизни носителей заряда увеличивается, концентрация электронов в оксиде цинка возрастает. Находящиеся в атмосфере молекулы кислорода реагируют с фотогенерированными электронами, что приводит к образованию отрицательно заряженных ионов кислорода и их адсорбции на поверхности НС ZnO:



Адсорбция фотоиндуцированных заряженных ионов  $\text{O}_2^-(h\nu)$  на поверхности НС ZnO приводит к образованию обедненной области. Фотоиндуцированные заряженные ионы  $\text{O}_2^-(h\nu)$  слабо связаны с поверхностью ZnO и в атмосфере паров изопропилового спирта взаимодействуют с молекулами спирта:



В ходе химической реакции с молекулами изопропилового спирта электроны возвращаются в зону проводимости оксида цинка, область обедненного заряда на поверхности НС уменьшается, а проводимость НС ZnO увеличивается. При подаче воздуха молекулы кислорода вновь адсорбируются на поверхности с захватом электронов из зоны проводимости, что приводит к восстановлению начального сопротивления.

Таким образом, декорирование НС ZnO ККТ AgInS<sub>2</sub> позволяет сенсибилизировать НС к видимому облучению за счет увеличения поглощения в видимой области и разделения носителей заряда на границе гетероперехода, обеспечивает газоаналитический отклик на пары изопропилового спирта при комнатной температуре в условиях облучения.

## Заключение

В работе представлена низкотемпературная методика формирования покрытий из НС ZnO, декорированных ККТ AgInS<sub>2</sub>. Анализ РФЭС показал, что декорирование НС ZnO ККТ AgInS<sub>2</sub> методом погружения в водный раствор обеспечивает их адсорбцию на поверхности НС. Показано, что нанокристаллы ZnO и ККТ AgInS<sub>2</sub> с оболочкой из молекул меркаптопропионовой кислоты формируют гетеропереход, а декорирование НС ККТ AgInS<sub>2</sub> обеспечивает увеличение фотопроводимости при облучении в видимом диапазоне. Полученные покрытия из НС ZnO, декорированные ККТ AgInS<sub>2</sub>, демонстрируют газоаналитический отклик 1.7 на пары изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm в условиях освещения при комнатной температуре. Таким образом, сенсибилизация НС ZnO ККТ AgInS<sub>2</sub> эффективна для разработки газочувствительных слоев с фотоактивацией, работоспособных при комнатной температуре в атмосфере сухого воздуха.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] V.A. Moshnikov, I.E. Gracheva, V.V. Kuznezov, A.I. Maximov, S.S. Karpova, A.A. Ponomareva. *J. Non-Cryst. Solid.*, **356**, 37 (2010). DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2010.06.030
- [2] С.С. Карпова, В.А. Мошников, С.В. Мякин, Е.С. Коловангина. *ФТП*, **47** (3), 369 (2013). [S.S. Karpova, V.A. Moshnikov, S.V. Mjakin, E.S. Kolovangina. *Semiconductors*, **47** (3), 392 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613030123]
- [3] С.С. Карпова, В.А. Мошников, А.И. Максимов, С.В. Мякин, Н.Е. Казанцева. *ФТП*, **47**, 1022 (2013). [S.S. Karpova, V.A. Moshnikov, A.I. Maksimov, S.V. Mjakin, N.E. Kazantseva. *Semiconductors*, **47**, 1026 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613080095]
- [4] Л.К. Крастева, Д.Ц. Димитров, К.И. Папазова, Н.К. Николаев, Т.В. Пешкова, В.А. Мошников, И.Е. Грачева, С.С. Карпова, Н.В. Канева. *ФТП*, **47** (4), 564 (2013). [L.K. Krasteva, D.T. Dimitrov, K.I. Papazova, N.K. Nikolaev, T.V. Peshkova, N.V. Kaneva, V.A. Moshnikov, I.E. Gracheva, S.S. Karpova. *Semiconductors*, **47** (4), 586 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613030123]
- [5] D.T. Dimitrov, N.K. Nikolaev, K.I. Papazova, L.K. Krasteva, A.S. Vojinova, T.V. Peshkova, N.V. Kaneva, I.A. Pronin, I.A. Averin, N.D. Yakushova, A.A. Karmanov, A.T. Georgieva, V.A. Moshnikov. *Appl. Surf. Sci.*, **392**, 95 (2017). DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.08.049
- [6] S. Mahajan, S. Jagtap. *Appl. Mater. Today*, **18**, 100483 (2020). DOI: 10.1016/j.apmt.2019.100483
- [7] V.K. Tomer, R. Malik, A. Kailasam. *ACS Omega*, **2**, 3658 (2017). DOI: 10.1021/acsomega.7b00479
- [8] C. Gautam, C.S. Tiwary, L.D. Machado, S. Jose, S. Ozden, S. Biradar, D.S. Galvao, R.K. Sonker, B.C. Yadav, R. Vajtaia, P.M. Ajayan. *RSC Adv.*, **6**, 87888 (2016). DOI: 10.1039/C6RA18833H
- [9] F. Qu, Y. Yuan, R. Guarecuco, M. Yang. *Small*, **12**, 3128 (2016). DOI: 10.1002/smll.201600422
- [10] F. Qu, Y. Yuan, M. Yang. *Chem. Mater.*, **29**, 969 (2017). DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b03435
- [11] L. Zhu, C. Feng, F. Li, D. Zhang, C. Li, Y. Wang, Y. Lin, S. Ruan, Z. Chen. *RSC Adv.*, **4**, 61691 (2014). DOI: 10.1039/C4RA11010B
- [12] S. Hussain, T. Liu, M. Javed, N. Aslam, W. Zeng. *Sens. Act. B*, **239**, 1243 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.09.128
- [13] Q. Nie, W. Zhang, L. Wang, Z. Guo, C. Li, J. Yao, M. Li, D. Wu, L. Zhou. *Sens. Act. B*, **270**, 140 (2018). DOI: 10.1016/j.snb.2018.04.170
- [14] M. Zhang, H.C. Su, Y. Rheem, C.M. Hangarter, N.V. Myung. *J. Phys. Chem. C*, **116**, 20067 (2012). DOI: 10.1021/jp305393c
- [15] D.H. Shin, J.S. Lee, J. Jun, S.G. Kim, J. Jang. *ACS Appl. Mater. Interfac.*, **7**, 1746 (2015). DOI: 10.1021/am507314t
- [16] S. Mao, G. Lub, J. Chen. *J. Mater. Chem. A*, **2**, 5573 (2014). DOI: 10.1039/C3TA13823B
- [17] T.N. Ly, S. Park. *Sci. Reports*, **8**, 18030 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-36468-z
- [18] Y. Guo, T. Wang, F. Chen, X. Sun, X. Li, Z. Yu, P. Wan, X. Chen. *Nanoscale*, **8**, 12073 (2016). DOI: 10.1039/C6NR02540D
- [19] H.T. Hien, H.T. Giang, N.V. Hieu, T. Trung, C.V. Tuan. *Sens. Act. B*, **249**, 348 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2017.04.115
- [20] G.J. Choi, R.K. Mishra, J.S. Gwag. *Mater. Lett.*, **264**, 127385 (2020). DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127385
- [21] O. Faye, U. Eduok, J.A. Szpunar, A.C. Beye. *Physica E*, **117**, 113794 (2020). DOI: 10.1016/j.physe.2019.113794
- [22] J. Wang, S. Fan, Y. Xia, C. Yang, S. Komarneni. *J. Hazard. Mater.*, **381**, 120919 (2020). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120919
- [23] Y. Gui, K. Tian, J. Liu, L. Yang, H. Zhang, Y. Wang. *J. Hazard. Mater.*, **380**, 120876 (2019). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120876
- [24] H. Ma, L. Yu, X. Yuan, Y. Li, C. Li, M. Yin, X. Fan. *J. Alloys Compounds*, **782**, 1121 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.180
- [25] M. Wang, Y. Zhu, D. Meng, K. Wang, C. Wang. *Mater. Lett.*, **277**, 128372 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128372>
- [26] A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko, S.S. Nalimova, A.A. Semenova, A.I. Maksimov, E.A. Levkevich, V.A. Moshnikov. 2018 Proceed. IEEE Intern. Conf. Electr. Eng. Photon., EExPolytech., 219 (2018). DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564407
- [27] S.S. Nalimova, V.M. Kondratev, A.A. Ryabko, A.I. Maksimov, V.A. Moshnikov. *J. Phys. Conf. Series*, **1658**, 012033 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012033
- [28] Y.-T. Tsai, S.-J. Chang, L.-W. Ji, Y.-J. Hsiao, I.-T. Tang, H.-Y. Lu, Y.-L. Chu. *ACS Omega*, **3**, 13798 (2018). DOI: 10.1021/acsomega.8b01882
- [29] E. Espid, F. Taghipour. *Sens. Actuators B*, **241**, 828 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.10.129
- [30] J. Jiang, L. Shi, T. Xie, D. Wang, Y. Lin. *Sens. Actuators B*, **254**, 863 (2018). DOI: 10.1016/j.snb.2017.07.197
- [31] A.A. Ryabko, S.S. Nalimova, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov. Proceed. 2021 IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 1180 (2021). DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396166
- [32] J. Prades, R. Jiménez-Díaz, F. Hernandez-Ramírez, S. Barth, A. Cirera, A. Romano-Rodríguez, S. Mathur, J.R. Morante. *Sens. Act. B*, **140**, 337 (2009). DOI: 10.1016/j.snb.2009.04.070
- [33] J. Li, D. Gu, Y. Yang, H. Du, X. Li. *Front. Mater.*, **6**, 158 (2019). DOI: 10.3389/fmats.2019.00158
- [34] A. Chizhov, M. Romyantseva, R. Vasiliev, D. Filatov, K. Drozdov, I. Krylov, A. Abakumov, A. Gaskov. *Sens. Act. B*, **205**, 305 (2014). DOI: 10.1016/j.snb.2014.08.091
- [35] H. Li, J. Yoon, C. Lee, K. Lim, J. Yoon, J. Lee. *Sens. Act. B*, **255**, 2963 (2018). DOI: 10.1016/j.snb.2017.09.118
- [36] D. Zhang, G. Dong, Y. Cao, Y. Zhang. *J. Colloid Interface Sci.*, **528**, 184 (2018). DOI: 10.1016/j.jcis.2018.05.085
- [37] R. Chen, J. Wang, Y. Xia, L. Xiang. *Sens. Act. B*, **255**, 2538 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2017.09.059
- [38] H. Wang, J. Bai, M. Dai, K. Liu, Y. Liu, L. Zhou, F. Liu, F. Liu, Y. Gao, X. Yan, L. Geyu. *Sens. Act. B*, **304**, 127287 (2020). DOI: 10.1016/J.SNB.2019.127287
- [39] X. Geng, J. You, J. Wang, C. Zhang. *Mater. Chem. Phys.*, **191**, 114 (2017). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.01.046
- [40] J. Zhou, N. Xu, Z.L. Wang. *Adv. Mater.*, **18**, 2432 (2006). DOI: 10.1002/adma.200600200

- [41] S. Rackauskas, N. Barbero, C. Barolo, G. Viscardi. *Nanomater.*, **7**, 381 (2017). DOI:10.3390/nano7110381
- [42] R. Castro, R. Pásco, M. Saraiva, J. Santos, D. Ribeiro. *Spectrochim. Acta Part A: Molec. Biomolec. Spectroscopy*, **267**, 120592 (2022). DOI: 10.1016/j.saa.2021.120592
- [43] P. Ganguly, S. Mathew, L. Clarizia, S. Kumar, A. Akande, S.J. Hinder, A. Breen, S.C. Pillai. *ACS Omega*, **5**, 406 (2020). DOI: 10.1021/acsomega.9b02907
- [44] X. Zheng, Y. Mao, J. Wen, X. Fu, X. Liu. *Nanomater.*, **9**, 1567 (2019). DOI: 10.3390/nano9111567
- [45] А.А. Рябко, А.И. Максимов, В.Н. Вербицкий, В.С. Левицкий, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *ФТП*, **54**, 1251 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.11.50098.9480 [A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov, E.I. Terukov, V.N. Verbitskii, V.S. Levitskii. *Semiconductors*, **54**, 1496 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620110238]
- [46] A. Raevskaya, V. Lesnyak, D. Haubold, V. Dzhagan, O. Stroyuk, N. Gaponik, D.R. Zahn, A. Eychmüller. *J. Phys. Chem. C*, **121**, 9032 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b00849
- [47] G.H. Carey, A.L. Abdelhady, Z. Ning, S.M. Thon, O.M. Bakr, E.H. Sargent. *Chem. Rev.*, **115**, 12732 (2015). DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00063
- [48] O.A. Korepanov, D.S. Mazing, O.A. Aleksandrova, V.A. Moshnikov, A.S. Komolov, E.F. Lazneva, D.A. Kirilenko. *Phys. Solid State*, **61** (12), 2326 (2019). DOI: 10.1134/S1063783419120217
- [49] O.A. Александрова, Ю.В. Балакшин, А.Д. Большаков, В.М. Кондратьев, О.А. Корепанов, Д.С. Мазинг, А.И. Максимов, Е.В. Марасева, В.А. Мошников, Е.Н. Муратова, А.В. Назаров, С.С. Налимова, В.А. Никонова, Н.В. Пермяков, Ю.С. Реутов, А.А. Рябко, А.В. Старцева, А.А. Шемухин, *Наночастицы, наносистемы и их применение. Формирование наносистем для сенсорики и медицины* (СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, СПб., 2021), p. 9–51.
- [50] P.-T. Hsieh, Y.-C. Chen, K.-S. Kao, C.-M. Wan. *Appl. Phys. A*, **90**, 317 (2008). DOI: 10.1007/s00339-007-4275-3
- [51] S.S. Nalimova, A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V. Moshnikov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012128 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012128
- [52] S. Zang, Y. Wang, W. Su, H. Zhu, G. Li, X. Zhang, Y. Liu. *Phys. Status Solidi RRL*, **10**, 745 (2016). DOI: 10.1002/pssr.201600220
- [53] C.M. Chuang, P.R. Brown, V. Bulovic, M.G. Bawendi. *Nat. Mater.*, **13**, 796 (2014). DOI: 10.1038/NMAT3984
- [54] S. Peng, S. Zhang, S.G. Mhaisalkar, S. Ramakrishna. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **14**, 8523 (2012). DOI: 10.1039/C2CP40848A
- [55] Y. Yang, Y. Liu, B. Mao, B. Luo, K. Zhang, W. Wei, Z. Kang, W. Shi, S. Yuan. *Catal. Lett.*, **149**, 1800 (2019). DOI: 10.1007/s10562-019-02718-6
- [56] P.-T. Hsieh, Y.-C. Chen, K.-S. Kao, C.-M. Wang. *Appl. Phys. A*, **90**, 317 (2008). DOI: 10.1007/s00339-007-4275