

**Нанокompозиты оксидов металлов с плазмонными наночастицами:
синтез и диагностика**

З.В. Шомахов¹, С.С. Налимова², В.А. Мошников²

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 лит. Ф
shozamir@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.764

Аннотация: Плазмонные наноструктуры на основе оксидов металлов, модифицированных наночастицами благородных металлов привлекают все большее внимание исследователей, работающих в областях фотодинамической терапии, биосенсоров, фотоники, оптоэлектроники, поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии и катализа. При этом характеристики полученных нанокompозитов определяются размерами наночастиц, зависящими от методов и условий синтеза. В данной работе проанализированы подходы к синтезу нанокompозитов «плазмонные наночастицы – оксид металла». Рассмотрены методы, позволяющие получить металлические наночастицы на поверхности предварительно синтезированного оксида металла. К ним относятся различные способы осаждения из газовой фазы и из раствора. Выделена группа методов одностадийного синтеза нанокompозитов, в которую входят вариации золь-гель метода и др. Проанализированы размер частиц, распределение частиц по размеру и однородность расположения металлических наночастиц в формируемых нанокompозитах. Показаны возможности контроля взаимодействия компонентов в нанокompозитах с помощью спектроскопии диффузного отражения по появлению полос поглощения, соответствующих плазмонным эффектам. Взаимодействие компонентов приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны композитных материалов. Дополнительными методами диагностики являются рамановская спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, при этом анализируется изменение положения характерных пиков, а также метод зонда Кельвина в сканирующей зондовой микроскопии.

Ключевые слова: плазмонные наночастицы, оксид металла, нанокompозиты, синтез, оптическая спектроскопия.

Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., директор института электроники, робототехники и искусственного интеллекта Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова

Налимова Светлана Сергеевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Мошников Вячеслав Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Review

Metal oxide nanocomposites with plasmonic nanoparticles: synthesis and diagnostics

Z.V. Shomakhov¹, S.S. Nalimova², V.A. Moshnikov²

¹Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.764

Abstract: Plasmonic nanostructures based on metal oxides modified with noble metal nanoparticles have been attracting increasing attention among researchers working in fields such as photodynamic

therapy, biosensors, photonics, optoelectronics, surface-enhanced Raman spectroscopy, and catalysis. The characteristics of these nanocomposites depend on the size of nanoparticles and are determined by the methods and conditions used for their synthesis. In this paper, approaches to the synthesis of «plasmonic nanoparticles – metal oxide» nanocomposites – are analyzed. Methods for producing metal nanoparticles on the surface of pre-synthesized metal oxides are considered, including various methods of precipitation from the gas and solution phases. A group of methods for the single-stage synthesis of nanocomposites is identified, which includes variations of the sol-gel method and others. The particle size, particle size distribution, and uniformity of the arrangement of metal nanoparticles in the formed nanocomposites are analyzed. The possibilities of controlling the interaction of components in nanocomposites are shown by using diffuse reflection spectroscopy by the appearance of absorption bands corresponding to plasmon effects. The interaction of components leads to a decrease in the band gap of composite materials. Additional diagnostic methods are Raman spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy, which analyze changes in the position of characteristic peaks, as well as the Kelvin probe method in scanning probe microscopy.

Keywords: plasmonic nanoparticles, metal oxide, nanocomposites, synthesis, optical spectroscopy.

Zamir V. Shomakhov – Ph. D., Director of the Institute of electronics, robotics and artificial intelligence, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, ORCID: 0000-0001-5738-2626

Svetlana S. Nalimova – Ph. D., Docent, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ORCID: 0000-0003-3065-3961

Vyacheslav A. Moshnikov – Dr. Sc., Professor, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ORCID: 0000-0001-6500-5492

Поступила в редакцию/received: 06.07.2025; после рецензирования/reviised: 15.08.2025; принята/accepted 17.08.2025.

1. Введение

В течение последних лет плазмонные наноструктуры на основе наночастиц благородных металлов привлекают большое внимание исследователей. Их развитие привело к значительному прогрессу в ряде областей в первую очередь благодаря совершенствованию технологий изготовления. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс (ЛППР) возникает, когда размер наночастицы меньше, чем длина волны падающего света. При воздействии электромагнитного излучения в плазмонных наночастицах на границе их раздела с окружающей средой (обычно диэлектрической) возникают коллективные колебания электронов зоны проводимости. Колебания ограничены размерами наночастиц, поэтому длина волны ЛППР в спектрах поглощения наночастиц сильно зависит от их размера, формы, состава, расстояния между частицами и показателя преломления окружающей среды. Данный эффект приводит к многократному усилению электрического поля вблизи металлических наночастиц, повышая эффективность фотоиндуцированных реакций. Это активно используется в фотодинамической терапии, биосенсорах, фотонике, оптоэлектронике, поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии и катализе. Для реализации эффекта ЛППР и его применения создают композитные структуры металлических плазмонных наночастиц и полупроводниковых оксидов металлов. При этом необходимо контролировать размер наночастиц и их распределение. В

данном обзоре проанализированы методы и подходы, которые применяются для создания нанокomпозитов плазмонных наночастиц, в основном *Ag* и *Au*, с оксидами металлов, такими как *ZnO*, *SnO₂* и *TiO₂*.

2. Методы получения оксидов металлов с металлическими плазмонными наночастицами

Все подходы, разработанные к настоящему времени для получения систем «оксид металла – металлические плазмонные наночастицы», можно разделить на две большие группы. В первую группу входят методы, первым этапом которых является получение оксида металла, а вторым – осаждение на его поверхности металлических наночастиц. Распространенными методами получения оксидных материалов являются следующие: золь-гель синтез [1-5], химическое соосаждение [7-9], гидротермальный [10-16] и сольвотермальный методы [17]. При этом оксидный материал может быть получен как в виде тонкой пленки, так и в виде порошка.

Модифицирование может осуществляться осаждением частиц из газовой фазы. Один из подходов – это термическое испарение. Например, в работе [18] с помощью этого метода золотые наночастицы были нанесены на нанопровода *ZnO* с последующим их отжигом при 400°C для удаления воды. Разработанная методика позволяет контролировать чистоту, а также размер и плотность распределения металлических наночастиц за счет выбора толщины исходной металлической пленки и температуры отжига. Диаметр полученных *Au* наночастиц, закрепленных на поверхности наностержней оксида цинка, составлял 10-50 нм (см. рис. 1 а).

Другим способом нанесения металлических наночастиц на поверхность оксидов металлов из газовой фазы является распыление. Для функционализации нанопроводов *SnO₂* серебряными наночастицами было использовано радиочастотное распыление и отжиг при 350°C в атмосфере воздуха [19]. Диаметр полученных наночастиц составляет менее 20 нм. В работе [20] наночастицы золота были распылены на поверхность наностержней оксида цинка. При этом наночастицы равномерно распределялись по поверхности наностержней, а их размер составлял приблизительно 80 нм (см. рис. 1 б). Также золотые наночастицы с помощью магнетронного распыления наносили на поверхность наночастиц диоксида титана, и при увеличении количества циклов нанесения наблюдалось образование кластеров [21]. Метод атомно-слоевого осаждения был использован для нанесения наночастиц платины на поверхность наностержней оксида цинка, легированного галлием [22]. Было показано, что средний диаметр наночастиц платины при увеличении количества циклов от 10 до 150 увеличивается от $1,8 \pm 0,8$ нм до

5,8 ± 1,3 нм.

Рассматриваемые нанокомпозиты получают также при помещении оксидного материала в раствор с формированием на его поверхности металлических частиц при фотоосаждении / фотовосстановлении. Например, в работе [23] фотоосаждение использовалось для нанесения наночастиц *Ag* на тонкие нанопластины *Bi₂WO₆*. В результате образуются частицы размером 5-8 нм, равномерно распределенные по поверхности. Нанокомпозит *Au–ZnO* был получен методом фотовосстановления с последующим отжигом при 600°C [24]. Разброс полученных наночастиц по размерам составил 10-50 нм. При осаждении наночастиц платины в раствор добавляют метанол в качестве источника дырок, в то время как для фотовосстановления серебра это не требуется из-за его большей чувствительности к свету [25]. В работе [26] метанол также был добавлен для декорирования композитов цинкового феррита с восстановленным оксидом графена *ZnFe₂O₄/rGO* серебряными наночастицами.

Также для получения металлических наночастиц на поверхности оксидов металлов применяется восстановление наночастиц металла на поверхности оксидного материала в растворе. Например, метод погружения в раствор, содержащий соединение металла (*HAuCl₄*) и цитрат натрия. В результате большая часть металла осаждается на поверхность оксида [27]. Этим способом получены композиты *Au/TiO₂*, средний размер наночастиц золота составлял 2-5 нм. Авторами [28] наночастицы палладия были осаждены на поверхности оксида цинка из суспензии *PdCl₂* в этиленгликоле. Также для получения наночастиц малого диаметра на поверхности оксидов металлов может использоваться метод *in-situ* восстановления. При этом в раствор, содержащий соль и оксид, добавляют восстановитель *NaBH₄*. Этот метод был использован для осаждения *Ag* наночастиц на поверхность наностержней оксида цинка [29]. Полученные таким методом наночастицы имеют близкий размер разброс по размерам от 6 до 20 нм и неоднородное распределение по поверхности (см. рис. 1 в).

Выделяется метод погружения в коллоидный раствор наночастиц, однако в ряде работ сообщается об агрегации наночастиц на поверхности оксида металла. Например, этим методом получены гибридные наноструктуры, представляющие собой серебряные наночастицы на поверхности зерен оксида цинка [30]. Однако однородное распределение их по поверхности не было достигнуто. В работе [31] наночастицы серебра были нанесены на поверхность *TiO₂* погружением оксида в коммерческий коллоидный раствор *Argovit*, разбавленный водой. Средний диаметр частиц составлял 36 ± 13 нм. Также синтезированы гибридные структуры наностержней оксида цинка, покрытые наночастицами *Ag* и *Au* [32].

Сначала были приготовлены коллоидные растворы наночастиц золота (средний диаметр 13 нм) (см. рис. 1 г) и серебра (средний диаметр 10 нм), которые затем капали на подложки с наностержнями оксида цинка. При этом происходит закрепление отрицательно заряженных наночастиц на поверхности положительно заряженных наностержней за счет электростатических сил. Предложенный метод позволяет избежать агрегации наночастиц и достигнуть однородного их распределения по поверхности.

Другим методом закрепления металлических наночастиц на поверхности оксидов металлов является электрофорез. Важным фактором, влияющим на однородность и размер наночастиц металлов на поверхности оксидов, является выбор приложенного напряжения. Гибридная структура $Au-ZnO$ была получена погружением подложки с наностержнями оксида цинка в суспензию золотых наночастиц при приложении постоянного напряжения 20 В в течение 5-12 мин [33]. Это привело формированию золотых наночастиц размером от 10 до 30 нм.

Следующий подход заключается в синтезе на первом этапе металлических наночастиц заданной формы и размера с последующим модифицированием оксидными наночастицами. Синтез частиц $Au@ZnO@ZIF-8$ со структурой «ядро в оболочке» проводили следующим образом. На первом этапе получили Au нанопровода, на которых гидротермальным методом были выращена оболочка оксида цинка [34]. Еще в одном примере на первом этапе магнетронным распылением получены наночастицы серебра со средним размером 28 нм [35], затем с помощью электронно-лучевого испарения нанесена пленка TiO_2 , равномерно покрывающая подложку с Ag наночастицами (см. рис. 1 д).

Ко второй группе относятся методы, в которых композитные структуры синтезируются в одном цикле. Гибридные наноструктуры ZnO/Ag были получены золь-гель методом при вариации концентрации серебра от 0 до 20 мол.%) [36]. Экспериментально определенный размер частиц составил 1,5-3 нм. В работе [37] наностержни Au/SnO_2 получены *in-situ* модифицированием SnO_2 золотыми наночастицами в процессе электроспиннинга. Диаметр большинства Au наносфер был менее 10 нм. Разработан безводный золь-гель метод для получения гетероструктур TiO_2 с наночастицами золота, платины или серебра, в котором 2 мас.% прекурсора оксида металла заменяли соединением благородного металла [38]. В результате поверхность наночастиц TiO_2 (размером 4-10 нм) покрыта мелкодисперсными наночастицами благородного металла (см. рис. 1 е). Размер наночастиц платины составлял 2-3 нм, серебра – 1-2 нм, золота – 10-20 нм.

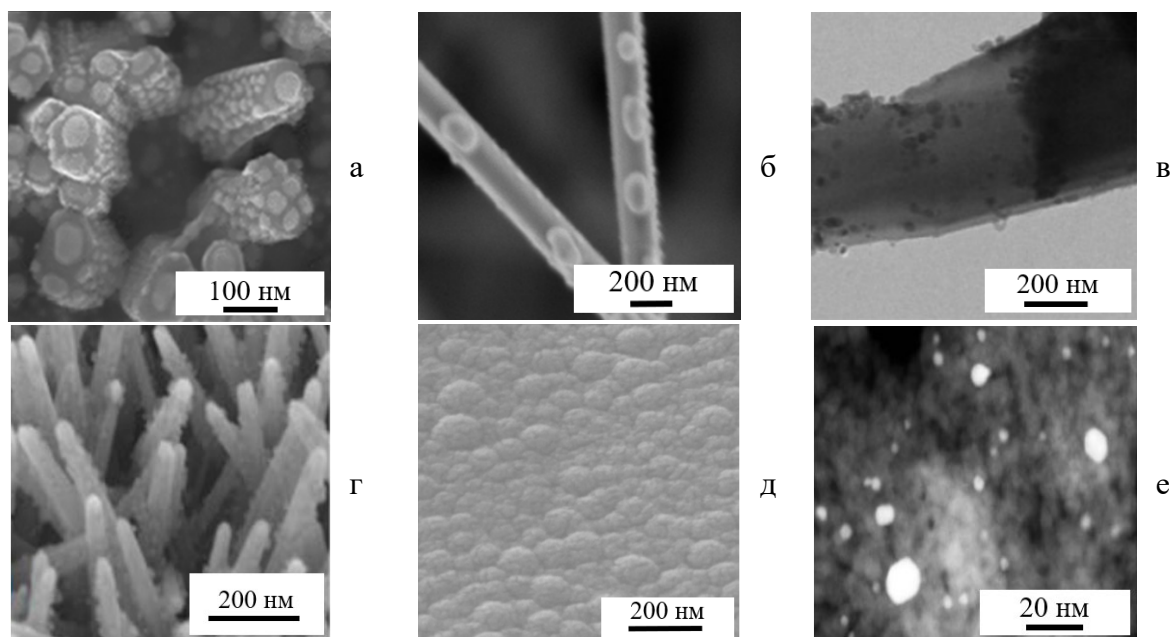


Рис. 1. Морфология оксидов металлов с плазмонными наночастицами, нанесенными различными методами: а – $ZnO - Au$ (термическое испарение) [18]; б – $ZnO - Au$ (распыление) [20]; в – $ZnO - Au$ (in-situ восстановление) [29]; г – $ZnO - Au$ (нанесение из коллоидного раствора) [32]; д – $TiO_2 - Ag$ (электронно-лучевое испарение) [35]; е – $TiO_2 - Pt$ (золь-гель метод) [38].

3. Методы исследования взаимодействия металлических плазмонных наночастиц с оксидами металлов

Как сказано выше, модифицирование оксидов металлов металлическими наночастицами широко применяется для различных целей. Взаимодействие этих материалов исследуют по изменению оптических свойств, химического состава или электрических свойств, в том числе в локальных областях.

Наиболее широко распространенным методом исследования оксидов металлов, модифицированных плазмонными наночастицами, является спектроскопия диффузного отражения в УФ и видимой областях. На спектрах наблюдается полоса поглощения в видимой области, соответствующая локализованному поверхностному плазмонному резонансу, когда частота фотонов падающего света совпадает с частотой осцилляций электронов проводимости в металлических наночастицах. Это обнаружено, например, для частиц золота на поверхности оксида цинка [24,39]. В этом случае наблюдается поглощение вблизи 550 нм. Для наночастиц $ZnO - Ag$ поглощение проявляется на длинах волн вблизи 500 нм [40], при этом при модифицировании наночастицами серебра ширина запрещенной зоны оксида цинка уменьшается. Авторы [41] отмечают уменьшение ширины запрещенной зоны TiO_2 от 3,1 до 2,7 эВ в

результате декорирования золотыми наночастицами. Этот эффект объясняется появлением дополнительных дефектов при взаимодействии с металлическими наночастицами [42]. В работе [43] показано уменьшение ширины запрещенной зоны ZnO от 3,17 до 3,12 эВ при декорировании серебряными наночастицами, однако авторы объясняют это увеличением размера частиц. В случае немонодисперсных частиц их разброс по размерам приводит к уширению полосы поглощения в видимой области [44].

Авторы [45] обнаружили две полосы поглощения в наностержневых оксида цинка, декорированных серебром. Они соответствуют экситонному поглощению (378 нм) и поверхностному плазмонному резонансу серебряных наночастиц (465 нм). Также ими обнаружен сдвиг полосы, соответствующей оксиду цинка, в длинноволновую область. Этот эффект объяснен притяжением электронов серебряными наночастицами из-за их большей электроотрицательности.

Обнаружено изменение частоты плазмонного резонанса наночастиц при взаимодействии с оксидами металлов. Этот эффект наблюдался другими авторами в системе $Au-TiO_2$ [46], и объяснен образованием барьера Шоттки на границе металл / полупроводник.

Фотолюминесценция полупроводников зависит от их микроструктуры, которая определяет такие процессы, как захват и перенос носителей заряда в этих материалах. В ряде работ показано, что при взаимодействии с металлическими наночастицами происходит уменьшение интенсивности фотолюминесценции полупроводников в видимой области [47]. Это объясняется поглощением фотонов за счет эффекта поверхностного плазмонного резонанса, а также уменьшением скорости рекомбинации электронно-дырочных пар. Однако в работе [39] показано увеличение интенсивности фотолюминесценции на глубоких уровнях, обусловленное релаксацией на поверхностных ловушках в системе $ZnO-Au$. Предполагается, что в этом случае металлические наночастицы создают дополнительные ловушки на глубоких уровнях. Таким образом, модифицирование металлическими наночастицами приводит к неоднозначному изменению спектров фотолюминесценции полупроводниковых оксидов металлов. Дополнительное влияние могут оказывать дефектные уровни в полупроводниках.

Так как при взаимодействии оксидов металлов с металлическими наночастицами происходит существенная модификация поверхности этих материалов, то эффективным способом оценки их взаимного влияния является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. При этом проводят оценку изменения положения фотоэлектронных пиков, соответствующих как металлическим частицам, так и элементам,

образующим оксид. Авторами [48] обнаружено смещение положения уровня $Au4f$ в сторону низких энергий связи. Авторы объясняют это переходом электронов оксида цинка к золотым наночастицам вследствие близости энергий донорного уровня оксида цинка и уровня Ферми золота, приводящим к формированию отрицательно заряженных наночастиц.

При взаимодействии серебряных наночастиц с оксидом цинка обнаружено смещение максимума уровня $Ag3d$ в сторону меньших энергий связи, которое авторы [49] связывают с образованием моновалентного серебра. Уменьшение энергии связи пика $Ag3d_{5/2}$ в системе $Ag-TiO_2$ авторы [50] объясняют переходом электронов от серебряных наночастиц к кислородным вакансиям диоксида титана.

Что касается состояния металла в оксиде, то иногда декорирование металлическими наночастицами не вызывает изменения положения пиков. Однако для системы $Au-SnO_2$ авторами [37] обнаружено смещение уровня $Sn3d$ в сторону меньшей энергии связи. В $Au-ZnO$ показано, что энергия связи уровня $Zn2p$ немного больше по сравнению с положением соответствующего пика в объемном ZnO , что объясняется недостатком кислорода и образованием ZnO_{1-x} [51]. Такая же тенденция наблюдается в системе $Ag-ZnO$, где сдвиг положения пика в сторону увеличения энергии связи объясняется взаимодействием оксида цинка с серебром. В работе [52] показано смещение положения уровней $Ti2p$ в сторону меньших энергий связи после декорирования наночастицами Au и Ag , что обусловлено процессами переноса электронов между металлом и полупроводником. Также ими показано, что положения пиков, соответствующих уровню $O1s$, также сдвигаются в сторону низких энергий связи, и увеличивается содержание кислородных вакансий.

Взаимодействие оксида металла с плазмонными наночастицами может быть проанализировано с помощью рамановской спектроскопии. Так, авторы [53] обнаружили смещение неполярной моды $ZnO(E_2)$ и полярных оптических мод ($E_1(LO)$) в высокочастотную область при модифицировании золотыми наночастицами. Также значительно увеличивается рассеяние моды E_1 вследствие усиления электромагнитного поля в Au из-за перехода электронов от оксида цинка к золотым наночастицам.

Также влияние металлических наночастиц на структуру поверхности оксидов продемонстрировано с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье [54], где зафиксирован сдвиг пиков, соответствующих колебаниям $Zn-O$ ($400-650\text{ см}^{-1}$), а также уменьшение их интенсивности, что связано с влиянием серебра.

Переход электронов между металлическими наночастицами и оксидом металла может также быть продемонстрирован с помощью сканирующей зондовой микроскопии (метод зонда Кельвина). Так, авторами [55] при исследовании карт поверхностных потенциалов обнаружено, что при освещении зеленым светом разность потенциалов как у чистых наностержней оксида цинка, так и у декорированных золотом существенно увеличивается по сравнению с темновыми условиями. В то же время воздействие красного света приводит к очень слабому изменению разности потенциалов. Это связано с переходом электронов, образующихся вследствие поверхностного плазмонного резонанса, к оксиду цинка, а также фотогенерацией носителей заряда с участием дефектных уровней оксида цинка.

4. Заключение

Анализ методов получения нанокомпозитов «оксид металла – плазмонные наночастицы» показал, что металлические наночастицы маленького размера с равномерным их распределением можно синтезировать с помощью фотовосстановления в растворе и золь-гель метода, а также атомно-слоевого осаждения. Для методов магнетронного напыления и осаждения из коллоидных растворов очень важно предотвратить агрегацию наночастиц, выбирая оптимальные условия синтеза. Эффективность формирования нанокомпозитов можно контролировать непосредственно по изменению спектров поглощения. Дополнительные методы диагностики, такие как рамановская спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, могут показать изменение состояния атомов благородных металлов и оксидов металлов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке внутреннего гранта КБГУ (договор № 33), а также в рамках программы «Приоритет 2030».

Библиографический список:

1. **Gracheva, I.E.** Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes / I.E. Gracheva, V.A. Moshnikov, E.V. Maraeva et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – V. 358. – I. 2. – P. 433-439. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.020.
2. **Li, A.** A general sol-gel route to fabricate large-area highly-ordered metal oxide arrays toward high-performance zinc-air batteries / A. Li, Y. Tan, Y. Wang et al. // Small. – 2025. – V. 28. – I. 5. – Art. № 2409620. – 13 p. DOI: 10.1002/sml.202409620.
3. **Hanini, F.** Correlating electronic structure and antibacterial activity in sol-gel synthesized iron-doped TiO₂ nanostructured thin films / F. Hanini, M. Guezoul, F. Bennabi et al. // Surfaces and Interfaces. – 2025. – V. 72. – Art. № 106978. – 15 p. DOI: 10.1016/j.surfin.2025.106978.
4. **Налимова, С.С.** Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металлооксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки / С.С. Налимова, С.В. Мякин, В.А. Мошников // Физика и химия стекла. – 2016. – Т. 42. – Вып. 6. – С. 773-780. DOI: 10.1134/S1087659616060171.

5. **Божинава, А.С.** Изучение фотокаталитических и сенсорных свойств нанокompозитных слоев ZnO/SiO₂ / А.С. Божинава, Н.В. Канева, И.Е. Кононова и др. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 12. – С. 1662-1666. DOI: 10.1134/S106378261312004X.
6. **Пешкова, Т.В.** Структуры из нанопроводов с переходами Zn-ZnO : CuO для детектирования паров этанола / Т.В. Пешкова, Д.Ц. Димитров, С.С. Налимова и др. // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – Вып. 5. – С. 143-148. DOI: 10.1134/S1063784214050259.
7. **Карпова, С.С.** Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ / С.С. Карпова, В.А. Мошников, С.В. Мясин, Е.С. Коловангина // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 3. – С. 369-372. DOI: 10.1134/S1063782613030123.
8. **Карпова, С.С.** Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ на их газочувствительность по отношению к парам этанола / С.С. Карпова, В.А. Мошников, А.И. Максимов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 8. – С. 1022-1026. DOI: 10.1134/S1063782613080095.
9. **Мошников, В.А.** Газочувствительные слои на основе фрактально-перколяционных структур / В.А. Мошников, С.С. Налимова, Б.И. Селезнев // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – Вып. 11. – С. 1535-1539. DOI: 10.1134/S1063782614110177.
10. **Han, B.** Hydrothermal synthesis of spherical nanoflower ZnO with highly sensitive isoprene sensing performance / B. Han, C. Wang, W. Yang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – V. 1023. – Art. № 180176. – 10 p. DOI: 10.1039/C9CE01556F.
11. **Буй, К.Д.** Покрытия из наностержней гетероструктуры ZnO/Zn₂SnO₄ для эффективного детектирования ацетона / К.Д. Буй, С.С. Налимова, З.В. Шомахов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 794-804. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.794.
12. **Шомахов, З.В.** Улучшение сенсорных характеристик бинарных и тройных оксидных наносистем / З.В. Шомахов, С.С. Налимова, А.А. Рыбина и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 879-887. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.879.
13. **Рябко, А.А.** Архитектоника покрытий из наностержней оксида цинка для адсорбционных газовых сенсоров / Рябко А.А., Налимова С.С., Пермьяков Н.В. и др. // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – Вып. 10. – С. 1494-1502. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56288.148-23.
14. **Бобков, А.А.** Получение гетероструктурных оксидных композиций для перспективных солнечных элементов нового поколения / А.А. Бобков, Н.А. Лашкова, А.И. Максимов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – Вып. 1. – С. 63-67. DOI: 10.1134/S1063782617010031.
15. **Налимова, С.С.** Исследование формирования слоев стannата цинка методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / С.С. Налимова, З.В. Шомахов, В.А. Мошников и др. // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – Вып. 7. – С. 1132-1135. DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49447.276-19.
16. **Bobkov, A.A.** Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature / A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko et al. // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, 22-23 October 2018, St. Petersburg. – New York, IEEE Publ, 2018. – P. 219-221. DOI: 10.1109/EEExPolytech.2018.8564407.
17. **Belew, A.A.** Solvothermal synthesis of metal oxide nanoparticles: a review of applications, challenges, and future perspectives / A.A. Belew, M.A. Assege // Results in Chemistry. – 2025. – V. 16. – Art. № 102438. – 20 p. DOI: 10.1016/j.rechem.2025.102438.
18. **Chakrabarty, P.** Light trapping-mediated room-temperature gas sensing by ordered ZnO nano structures decorated with plasmonic Au nanoparticles / P. Chakrabarty, M. Banik, N. Gogurla et al. // ACS Omega. – 2019. – V. 4. – I. 5. – P. 12071-12080. DOI: 10.1021/acsomega.9b01116.
19. **Cattabiani, N.** Tin oxide nanowires decorated with ag nanoparticles for visible light-enhanced hydrogen sensing at room temperature: bridging conductometric gas sensing and plasmon-driven catalysis / N. Cattabiani, C. Baratto, D. Zappa et al. // The Journal of Physical Chemistry C. – 2018. – V. 122. – I. 9. – P. 5026-5031. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b09807.
20. **Zheng, Z.Q.** Light-controlled C₂H₂ gas sensing based on Au-ZnO nanowires with plasmon-enhanced sensitivity at room temperature / Z.Q. Zheng, B. Wang, J.D. Yao, G.W. Yang // Journal of Materials Chemistry C. – 2015. – V. 3. – I. 27. – P. 7067-7074. DOI: 10.1039/C5TC01024A.
21. **Trzeciak, M.** Plasmonic effect of Au nanoparticles deposited onto TiO₂-impact on the photocatalytic conversion of acetaldehyde / M. Trzeciak, J. Przepiórski, A. Kałamaga, B. Tryba // Molecules. – 2025. – V. 30. – I. 15. – Art. № 3118. – 22 p. DOI: 10.3390/molecules30153118.
22. **Chiu, Y.-M.** Fabrication and characterization of well-dispersed plasmonic Pt nanoparticles on Ga-doped ZnO nanopagodas array with enhanced photocatalytic activity / H.-M. Chiu, T.-H. Yang, Y.-C. Hsueh // Applied Catalysis B: Environmental. – 2015. – V. 163. – P. 156-166. DOI: 10.1016/j.apcatb.2014.07.039.

23. **Bunluesak, T.** Visible-light-driven heterostructure Ag/Bi₂WO₆ nanocomposites synthesized by photodeposition method and used for photodegradation of rhodamine B dye / T. Bunluesak, A. Phuruangrat, S. Thongtem et al. // *Research on Chemical Intermediates*. – 2021. – V. 47. – I. 7. – P. 3079-3092. DOI: 10.1007/s11164-021-04456-0.
24. **Gogurla, N.** Multifunctional Au-ZnO plasmonic nanostructures for enhanced UV photodetector and room temperature NO sensing devices / N. Gogurla, A.K. Sinha, S. Santra // *Scientific Reports*. – 2014. – V. 4. – Art. № 6483. – 9 p. DOI: 10.1038/srep06483.
25. **Wang, Q.** Synthesis of Ag or Pt nanoparticle-deposited TiO₂ nanorods for the highly efficient photoreduction of CO₂ to CH₄ / Q. Wang, P. Dong, Z. Huang, X. Zhang // *Chemical Physics Letters*. – 2015. – V. 639. – P. 11-16. DOI: 10.1016/j.cplett.2015.08.068.
26. **Wang, K.** Three-dimensional graphene encapsulated Ag-ZnFe₂O₄ flower-like nanocomposites with enhanced photocatalytic degradation of enrofloxacin / K. Wang, S. Zhan, D. Zhang // *RCS Advances*. – 2021. – V. 11. – I. 8. – P. 4723-4739. DOI: 10.1039/d0ra09582f.
27. **Alsmadi, A.K.M.** Synthesis, photocatalytic, and photoelectric performance of mesoporous Au/TiO₂ and Au/TiO₂/MWCNT nanocomposites / A.K.M. Alsmadi, B. Salameh, O. Alshammari // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2025. – V. 207. – Art. № 112874. – 11 p. DOI: 10.1016/j.jpcs.2025.112874.
28. **Chen, R.** Unraveling photoexcited electron transfer pathway of oxygen vacancy-enriched ZnO/Pd hybrid toward visible light-enhanced methane detection at a relatively low temperature / R. Chen, J. Wang, S. Luo et al. // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2020. – V. 264. – Art. № 118554. – 9 p. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.118554.
29. **Motla, A.** Coupling effect and enhanced detection of organic dyes using SERS with Ag noble metal embellished hexagonal ZnO nanorods / A. Motla, D. Sharma, V.R. Soma, S. Annapoorni // *Optical Materials*. – 2024. – V. 149. – Art. № 115110. – 11 p. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115110.
30. **Ziashahabi, A.** The effect of silver oxidation on the photocatalytic activity of Ag/ZnO hybrid plasmonic/metal-oxide nanostructures under visible light and in the dark / A. Ziashahabi, M. Prato, Z. Dang et al. // *Scientific Reports*. – 2019. – V. 9. – Art. № 11839. – 12 p. DOI: 10.1038/s41598-019-48075-7.
31. **Simagina, V.I.** TiO₂-based photocatalysts for controllable hydrogen evolution from ammonia borane / V.I. Simagina, O.V. Komova, A.M. Ozerova et al. // *Catalysis Today*. – 2021. – V. 379. – P. 149-158. DOI: 10.1016/j.cattod.2020.04.070.
32. **Dao, T.D.** Plasmon-mediated photocatalytic activity of wet-chemically prepared ZnO nanowire arrays / T.D. Dao, G. Han, N. Arai et al. // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2015. – V. 17. – I. 11. – P. 7395-7403. DOI: 10.1039/C4CP05843G.
33. **Benghanoum, H.** Electrophoretic deposition of gold nanoparticles on highly ordered titanium dioxide nanotubes for photocatalytic application / H. Benghanoum, L. Khezami, R.B. Zaghouni et al. // *Catalysts*. – 2025. – V. 15. – I. 8. – Art. № 781. – 19 p. DOI: 10.3390/catal15080781.
34. **Wang, D.** Simultaneous detection and removal of formaldehyde at room temperature: Janus Au@ZnO@ZIF-8 nanoparticles / D. Wang, Z. Li, J. Zhou et al. // *Nano-Micro Letters*. – 2018. – V. 10. – I. 1. – Art. № 4. – 11 p. DOI: 10.1007/s40820-017-0158-0.
35. **Lo, T.-H.** The response of UV/blue light and ozone sensing using Ag-tio₂ planar nanocomposite thin film / T.-H. Lo, P.-Y. Shih, C.-H. Wu // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – I. 23. – Art. № 5061. – 10 p. DOI: 10.3390/s19235061.
36. **Samriti.** Sensitive, stable, and recyclable ZnO/Ag nanohybrid substrates for surface-enhanced raman scattering metrology / Samriti, P. Kumar, A. Yu. Kuznetsov et al. // *ACS Materials Au*. – 2024. – V. 4. – I. 4. – P. 413-423. DOI: 10.1021/acsmaterialsau.4c00002.
37. **Zhang, B.** High-performance room-temperature NO₂ gas sensor based on Au-loaded SnO₂ nanowires under UV light activation / B. Zhang, S. Zhang, Y. Xia et al. // *Nanomaterials*. – 2022. – V. 12. – I. 22. – Art. № 4062. – 20 p. DOI: 10.3390/nano12224062.
38. **Karmaoui, M.** Modification of anatase using noble-metals (Au, Pt, Ag): Toward a nanoheterojunction exhibiting simultaneously photocatalytic activity and plasmonic gas sensing / M. Karmaoui, L. Lajaunie, D.M. Tobaldi et al. // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2017. – V. 218. – P. 370-384. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.06.010.
39. **Qomaruddin.** Visible-light-driven room temperature NO₂ gas sensor based on localized surface plasmon resonance: the case of gold nanoparticle decorated zinc oxide nanorods (ZnO NRs) / Qomaruddin, O. Casals, H.S. Wasisto et al. // *Chemosensors*. – 2022. – V. 10. – I. 1. – Art. № 28. – 15 p. DOI: 10.3390/chemosensors10010028.
40. **Kaur, S.** Superior visible-light absorbing Ag@ZnO nanorods hybrid photocatalyst for efficient decomposition of commercial pharmaceuticals tetracycline and amoxicillin / S. Kaur, B. Pal // *Journal of Water Process Engineering*. – 2024. – V. 58. – Art. № 104765. – 14 p. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104765.

41. **Celebi, N.** Ligand-free fabrication of Au/TiO₂ nanostructures for plasmonic hot-electron-driven photocatalysis: photoelectrochemical water splitting and organic-dye degradation / N. Celebi, M.Y. Aydin, F. Soysal et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 860. – Art. № 157908. – 13 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157908.
42. **Ansari, S.A.** Gold nanoparticles-sensitized wide and narrow band gap TiO₂ for visible light applications: a comparative study / S.A. Ansari, M.M. Khan, M.O. Ansaria, M.H. Cho // *New Journal of Chemistry*. – 2015. – V. 39. – I. 6. – P. 4708-4715. DOI: 10.1039/C5NJ00556F.
43. **Kumar, R.** Visible light assisted surface plasmon resonance triggered Ag/ZnO nanocomposites: synthesis and performance towards degradation of indigo carmine dye / R. Kumar, S.Y. Janbandhu, G.K. Sukhadeve, R.S. Gedam // *Advanced Materials for Energy & Applications*. – 2023. – V. 30. – I. 44. – P. 98619-98631. DOI: 10.1007/s11356-022-22745-y.
44. **Bian, Z.** Au/TiO₂ superstructure-based plasmonic photocatalysts exhibiting efficient charge separation and unprecedented activity / Z. Bian, T. Tachikawa, P. Zhang et al. // *Journal of the American Chemical Society*. – 2014. – V. 136. – I. 1. – P. 458-465. DOI: 10.1021/ja410994f.
45. **Iftexhar Uddin, A.S.M.** Effects of Ag nanoparticles decorated on ZnO nanorods under visible light illumination on flexible acetylene gas sensing properties / A.S.M. Iftexhar Uddin, G.S. Chung // *Journal of Electroceramics*. – 2018. – V. 40. – I. 1. – P. 42-49. DOI: 10.1007/s10832-017-0096-8.
46. **Khore, S.K.** Solar light active plasmonic Au@TiO₂ nanocomposite with superior photocatalytic performance for H₂ production and pollutant degradation / S.K. Khore, S.R. Kadam, S.D. Naik et al. // *New Journal of Chemistry*. – 2018. – V. 42. – I. 13. – P. 10958-10968. DOI: 10.1039/C8NJ01410H.
47. **Khan, R.** Enhanced photoluminescence of ZnO nanorods via coupling with localized surface plasmon of Au nanoparticles / R. Khan, J.-H. Yun, K.-B. Bae, I.-H. Lee // *Journal of Alloys Compounds*. – 2016. – V. 682. – P. 643-646. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.036.
48. **Abdel-Fattah, E.M.** Plasmonic ZnO-Au nanocomposites: a synergistic approach to enhanced photocatalytic activity through nonthermal plasma-assisted synthesis / E.M. Abdel-Fattah // *Crystals*. – 2024. – V. 14. – I. 10. – Art. № 890. – 13 p. DOI: 10.3390/cryst14100890.
49. **Behera, R.** Semiconductor-bimetallic plasmonic heterojunction ZnO-Ag-Cu as reusable SERS substrate with attomolar detection limit / R. Behera, A. Nag // *Chemistry – An Asian Journal*. – 2025. – V. 20. – I. 9. – Art. № e202401580. – 15 p. DOI: 10.1002/asia.202401580.
50. **Lian, Z.** Plasmonic silver quantum dots coupled with hierarchical TiO₂ nanotube arrays photoelectrodes for efficient visible-light photoelectrocatalytic hydrogen evolution / Z. Lian, W. Wang, S. Xiao et al. // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 5. – Art. № 10461. – 10 p. DOI: 10.1038/srep10461.
51. **Kim, K.-J.** Visible-light-sensitive nanoscale Au-ZnO photocatalysts / K.-J. Kim, P.B. Kreider, C.-H. Chang et al. // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2013. – V. 15. – I. 5. – Art. № 1606. – 24 p. DOI: 10.1007/s11051-013-1606-5.
52. **Bamola, P.** Interfacial interaction of plasmonic nanoparticles (Ag, Au) decorated floweret TiO₂ nanorod hybrids for enhanced visible light driven photocatalytic activity / P. Bamola, M. Sharma, C. Dwivedi et al. // *Materials Science and Engineering: B*. – 2021. – V. 273. – Art. № 115403. – 13 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115403.
53. **Cheng, Y.** Insights into charge transfer and solar light photocatalytic activity induced by the synergistic effect of defect state and plasmon in Au nanoparticle-decorated hierarchical 3D porous ZnO microspheres / Y. Cheng, W. Wang, L. Yao et al. // *Applied Surface Science*. – 2019. – V. 494. – P. 959-968. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.07.257.
54. **Zhang, Q.** Visible light-assisted room temperature gas sensing with ZnO-Ag heterostructure nanoparticles / Q. Zhang, G. Xie, M. Xu et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2018. – V. 259. – P. 269-281. DOI: 10.1016/j.snb.2017.12.052.
55. **Kim, D.W.** Plasmon expedited response time and enhanced response in gold nanoparticles-decorated zinc oxide nanowire-based nitrogen dioxide gas sensor at room temperature / D.W. Kim, K.H. Park, S.-H. Lee et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2021. – V. 582. – Part B. – P. 658-668. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.08.082.

References:

1. Gracheva I.E., Moshnikov V.A., Maraeva E.V. et al. Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, issue 2, pp. 433-439. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.020.
2. Li A., Tan Y., Wang Y. et al. A general sol-gel route to fabricate large-area highly-ordered metal oxide arrays toward high-performance zinc-air batteries, *Small*, 2025, vol. 28, issue 5, art. no 2409620, 13 p. DOI:

10.1002/sml.202409620.

3. Hanini F., Guezoul M., Bennabi F. et al. Correlating electronic structure and antibacterial activity in sol-gel synthesized iron-doped TiO₂ nanostructured thin films, *Surfaces and Interfaces*, 2025, vol. 72, art. no 106978, 15 p. DOI: 10.1016/j.surfin.2025.106978.

4. Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Myakin S.V. Controlling surface functional composition and improving the gas-sensing properties of metal oxide sensors by electron beam processing, *Glass Physics and Chemistry*, 2016, vol. 42, issue 6, pp. 597-601. DOI: 10.1134/S1087659616060171.

5. Bozhinova A.S., Kaneva N.V., Kononova I.E. et al. Study of the photocatalytic and sensor properties of ZnO/SiO₂ nanocomposite layers, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, issue 12, pp. 1636-1640. DOI: 10.1134/S106378261312004X.

6. Peshkova T.V. Dimitrov D.T., Nalimova S.S. et al. Structures of nanowires with Zn-ZnO:CuO junctions for detecting ethanol vapors, *Technical Physics*, 2014, vol. 59, issue 5, pp. 771-776. DOI: 10.1134/S1063784214050259.

7. Karpova S.S., Moshnikov V.A., Mjakin S.V., Kolovangina E.S. Surface functional composition and sensor properties of ZnO, Fe₂O₃, and ZnFe₂O₄, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, issue 3, pp. 392-395. DOI: 10.1134/S1063782613030123.

8. Karpova S.S., Moshnikov V.A., Maksimov A.I. et al. Study of the effect of the acid-base surface properties of ZnO, Fe₂O₃ and ZnFe₂O₄ oxides on their gas sensitivity to ethanol vapor, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, issue 8, pp. 1026-1030. DOI: 10.1134/S1063782613080095.

9. Moshnikov V.A., Nalimova S.S., Seleznev B.I. Gas-sensitive layers based on fractal-percolation structures *Semiconductors*, 2014, vol. 48, issue 11, pp. 1499-1503. DOI: 10.1134/S1063782614110177.

10. Han B., Wang C., Yang W. et al. Hydrothermal synthesis of spherical nanoflower ZnO with highly sensitive isoprene sensing performance, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1023, art. no 180176, 10 p. DOI: 10.1039/C9CE01556F.

11. Bui C.D., Nalimova S.S., Shomakhov Z.V et al. Pokrytiya iz nanosterzhnej geterostruktury ZnO/Zn₂SnO₄ dlya effektivnogo detektirovaniya atsetona [ZnO/Zn₂SnO₄ nanorod heterostructure coatings for effective detection of acetone], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 794-804. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.794. (In Russian).

12. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Rybina A.A. et al. Uluchshenie sensorykh kharakteristik binarnykh i trojnykh oksidnykh nanosistem [Improving the sensor characteristics of binary and ternary oxide nanosystems], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 879-887. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.879. (In Russian).

13. Ryabko A.A., Nalimova S.S., Permyakov N.V. et al. Architectonics of zinc oxide nanorod coatings for adsorption gas sensors, *Technical Physics*, 2024, vol. 69, pp 1494-1502. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56288.148-23.

14. Bobkov A.A., Lashkova N.A., Maximov A.I. et al. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, issue 1, pp. 61-65. DOI: 10.1134/S1063782617010031.

15. Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Bobkov A.A. et al. An X-ray photoelectron spectroscopy study of zinc stannate layer formation, *Technical Physics*, 2020, vol. 65, issue 7, pp. 1087-1090. DOI: 10.1134/S1063784220070142.

16. Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A. et al. Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature, *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, 22-23 October 2018, St. Petersburg. New York, IEEE Publ, 2018, pp. 219-221. DOI: 10.1109/EEExPolytech.2018.8564407.

17. Belew A.A., Assege M.A. Solvothermal synthesis of metal oxide nanoparticles: a review of applications, challenges, and future perspectives, *Results in Chemistry*, 2025, vol. 16, art. no 102438, 20 p. DOI: 10.1016/j.rechem.2025.102438.

18. Chakrabarty P., Banik M., Gogurla N. et al. Light trapping-mediated room-temperature gas sensing by ordered ZnO nano structures decorated with plasmonic Au nanoparticles, *ACS Omega*, 2019, vol. 4, issue 5, pp. 12071-12080. DOI: 10.1021/acsomega.9b01116.

19. Cattabiani N., Baratto C., Zappa D. et al. Tin oxide nanowires decorated with ag nanoparticles for visible light-enhanced hydrogen sensing at room temperature: bridging conductometric gas sensing and plasmon-driven catalysis, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, vol. 122, issue. 9, pp. 5026–5031. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b09807.

20. Zheng Z.Q., Wang B., Yao J.D., Yang G.W. Light-controlled C₂H₂ gas sensing based on Au–ZnO nanowires

- with plasmon-enhanced sensitivity at room temperature, *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, vol. 3, issue 27, pp. 7067-7074. DOI: 10.1039/C5TC01024A.
21. Trzeciak M., Przepiórski J., Kałamaga A., Tryba B. Plasmonic effect of Au nanoparticles deposited onto TiO₂-impact on the photocatalytic conversion of acetaldehyde, *Molecules*, 2025, vol. 30, issue 15, art. no 3118, 22 p. DOI: 10.3390/molecules30153118.
22. Chiu H.-M., Yang T.-H., Hsueh Y.-C. Fabrication and characterization of well-dispersed plasmonic Pt nanoparticles on Ga-doped ZnO nanopagodas array with enhanced photocatalytic activity, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, vol. 163, pp. 156-166. DOI: 10.1016/j.apcatb.2014.07.039.
23. Bunluesak T., Phuruangrat A., Thongtem S. et al. Visible-light-driven heterostructure Ag/Bi₂WO₆ nanocomposites synthesized by photodeposition method and used for photodegradation of rhodamine B dye, *Research on Chemical Intermediates*, 2021, vol. 47, issue 7, pp. 3079-3092. DOI: 10.1007/s11164-021-04456-0.
24. Gogurla N., Sinha A.K., Santra S. Multifunctional Au-ZnO plasmonic nanostructures for enhanced UV photodetector and room temperature NO sensing devices, *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, art. no 6483, 9 p. DOI: 10.1038/srep06483.
25. Wang Q., Dong P., Huang Z., Zhang X. Synthesis of Ag or Pt nanoparticle-deposited TiO₂ nanorods for the highly efficient photoreduction of CO₂ to CH₄, *Chemical Physics Letters*, 2015, vol. 639, pp. 11-16. DOI: 10.1016/j.cplett.2015.08.068.
26. Wang K., Zhan S., Zhang D. Three-dimensional graphene encapsulated Ag-ZnFe₂O₄ flower-like nanocomposites with enhanced photocatalytic degradation of enrofloxacin, *RCS Advances*, 2021, vol. 11, issue 8, pp. 4723-4739. DOI: 10.1039/d0ra09582f.
27. Alsmadi A.K.M., Salameh B., Alshammari O. Synthesis, photocatalytic, and photoelectric performance of mesoporous Au/TiO₂ and Au/TiO₂/MWCNT nanocomposites, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2025, vol. 207, art. no 112874, 11 p. DOI: 10.1016/j.jpss.2025.112874.
28. Chen R., Wang J., Luo S. et al. Unraveling photoexcited electron transfer pathway of oxygen vacancy-enriched ZnO/Pd hybrid toward visible light-enhanced methane detection at a relatively low temperature, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, vol. 264, art. no 118554, 9 p. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.118554.
29. Motla A., Sharma D., Soma V.R., Annapoorni S. Coupling effect and enhanced detection of organic dyes using SERS with Ag noble metal embellished hexagonal ZnO nanorods, *Optical Materials*, 2024, vol. 149, art. no 115110, 11 p. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115110.
30. Ziashahabi A., Prato M., Dang Z. et al. The effect of silver oxidation on the photocatalytic activity of Ag/ZnO hybrid plasmonic/metal-oxide nanostructures under visible light and in the dark, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, art. no 11839, 12 p. DOI: 10.1038/s41598-019-48075-7.
31. Simagina V.I., Komova O.V., Ozerova A.M. et al. TiO₂-based photocatalysts for controllable hydrogen evolution from ammonia borane, *Catalysis Today*, 2021, vol. 379, pp. 149-158. DOI: 10.1016/j.cattod.2020.04.070.
32. Dao T.D., Han G., Arai N. et al. Plasmon-mediated photocatalytic activity of wet-chemically prepared ZnO nanowire arrays, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, vol. 17, issue 11, pp. 7395-7403. DOI: 10.1039/C4CP05843G.
33. Benghanoum H., Khezami L., Zaghouni R.B. et al. Electrophoretic deposition of gold nanoparticles on highly ordered titanium dioxide nanotubes for photocatalytic application, *Catalysts*, 2025, vol. 15, issue 8, art. no 781, 19 p. DOI: 10.3390/catal15080781.
34. Wang D., Li Z., Zhou J. et al. Simultaneous detection and removal of formaldehyde at room temperature: Janus Au@ZnO@ZIF-8 nanoparticles, *Nano-Micro Letters*, 2018, vol. 10, issue 1, art. no 4, 11 p. DOI: 10.1007/s40820-017-0158-0.
35. Lo T.-H., Shih P.-Y., Wu C.-H. The response of UV/blue light and ozone sensing using Ag-TiO₂ planar nanocomposite thin film, *Sensors*, 2019, vol. 19, issue 23, art. no 5061, 10 p. DOI: 10.3390/s19235061.
36. Samriti, Kumar P., Kuznetsov A.Yu. et al. Sensitive, stable, and recyclable ZnO/Ag nanohybrid substrates for surface-enhanced raman scattering metrology, *ACS Materials Au*, 2024, vol. 4, issue 4, pp. 413-423. DOI: 10.1021/acsmaterialsau.4c00002.
37. Zhang B., Zhang S., Xia Y. et al. High-performance room-temperature NO₂ gas sensor based on Au-loaded SnO₂ nanowires under UV light activation, *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, issue 22, art. no 4062, 20 p. DOI: 10.3390/nano12224062.
38. Karmaoui M., Lajaunie L., Tobaldi D.M. et al. Modification of anatase using noble-metals (Au, Pt, Ag): Toward a nanoheterojunction exhibiting simultaneously photocatalytic activity and plasmonic gas sensing, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, vol. 218, pp. 370-384. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.06.010.
39. Qomaruddin, Casals O., Wasisto H.S. et al. Visible-light-driven room temperature NO₂ gas sensor based on localized surface plasmon resonance: the case of gold nanoparticle decorated zinc oxide nanorods (ZnO NRs), *Chemosensors*, 2022, vol. 10, issue 1, art. no 28, 15 p. DOI: 10.3390/chemosensors10010028.

40. Kaur S., Pal B. Superior visible-light absorbing Ag@ZnO nanorods hybrid photocatalyst for efficient decomposition of commercial pharmaceuticals tetracycline and amoxicillin, *Journal of Water Process Engineering*, 2024, vol. 58, art. no 104765, 14 p. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104765.
41. Celebi N., Aydin M.Y., Soysal F. et al. Ligand-free fabrication of Au/TiO₂ nanostructures for plasmonic hot-electron-driven photocatalysis: photoelectrochemical water splitting and organic-dye degradation, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 860, art. no 157908, 13 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157908.
42. Ansari S.A., Khan M.M., Ansaria M.O., Cho M.H. Gold nanoparticles-sensitized wide and narrow band gap TiO₂ for visible light applications: a comparative study, *New Journal of Chemistry*, 2015, vol. 39, issue 6, pp. 4708-4715. DOI: 10.1039/C5NJ00556F.
43. Kumar R., Janbandhu S.Y., Sukhadeve G.K., Gedam R.S. Visible light assisted surface plasmon resonance triggered Ag/ZnO nanocomposites: synthesis and performance towards degradation of indigo carmine dye, *Advanced Materials for Energy & Applications*, 2023, vol. 30, issue 44, pp. 98619–98631. DOI: 10.1007/s11356-022-22745-y.
44. Bian Z., Tachikawa T., Zhang P. et al. Au/TiO₂ superstructure-based plasmonic photocatalysts exhibiting efficient charge separation and unprecedented activity, *Journal of the American Chemical Society*, 2014, vol. 136, issue 1, pp. 458-465. DOI: 10.1021/ja410994f.
45. Iftekhhar Uddin A.S.M., Chung G.S. Effects of Ag nanoparticles decorated on ZnO nanorods under visible light illumination on flexible acetylene gas sensing properties, *Journal of Electroceramics*, 2018, vol. 40, issue 1, pp. 42-49. DOI: 10.1007/s10832-017-0096-8.
46. Khore S.K., Kadam S.R., Naik S.D. et al. Solar light active plasmonic Au@TiO₂ nanocomposite with superior photocatalytic performance for H₂ production and pollutant degradation, *New Journal of Chemistry*, 2018, vol. 42, issue 13, pp. 10958-10968. DOI: 10.1039/C8NJ01410H.
47. Khan R., Yun J.-H., Bae K.-B., Lee I.-H. Enhanced photoluminescence of ZnO nanorods via coupling with localized surface plasmon of Au nanoparticles, *Journal of Alloys Compounds*, 2016, vol. 682, pp. 643-646. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.036.
48. Abdel-Fattah E.M. Plasmonic ZnO-Au nanocomposites: a synergistic approach to enhanced photocatalytic activity through nonthermal plasma-assisted synthesis, *Crystals*, 2024, vol. 14, issue 10, art. no 890, 13 p. DOI: 10.3390/cryst14100890.
49. Behera R., Nag A. Semiconductor-bimetallic plasmonic heterojunction ZnO-Ag-Cu as reusable SERS substrate with attomolar detection limit, *Chemistry – An Asian Journal*, 2025, vol. 20, issue 9, art. no e202401580, 15 p. DOI: 10.1002/asia.202401580.
50. Lian Z., Wang W., Xiao S. et al. Plasmonic silver quantum dots coupled with hierarchical TiO₂ nanotube arrays photoelectrodes for efficient visible-light photoelectrocatalytic hydrogen evolution, *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, art. no 10461, 10 p. DOI: 10.1038/srep10461.
51. Kim K.-J., Kreider P.B., Chang C.-H. et al. Visible-light-sensitive nanoscale Au-ZnO photocatalysts, *Journal of Nanoparticle Research*, 2013, vol. 15, issue 5, art. no 1606, 24 p. DOI: 10.1007/s11051-013-1606-5.
52. Bamola P., Sharma M., Dwivedi C. et al. Interfacial interaction of plasmonic nanoparticles (Ag, Au) decorated floweret TiO₂ nanorod hybrids for enhanced visible light driven photocatalytic activity, *Materials Science and Engineering: B*, 2021, vol. 273, art. no 115403, 13 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115403.
53. Cheng Y., Wang W., Yao L. et al. Insights into charge transfer and solar light photocatalytic activity induced by the synergistic effect of defect state and plasmon in Au nanoparticle-decorated hierarchical 3D porous ZnO microspheres, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 494, pp. 959-968. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.07.257.
54. Zhang Q., Xie G., Xu M. et al. Visible light-assisted room temperature gas sensing with ZnO-Ag heterostructure nanoparticles, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, vol. 259, pp. 269-281. DOI: 10.1016/j.snb.2017.12.052.
55. Kim D.W., Park K.H., Lee S.-H. et al. Plasmon expedited response time and enhanced response in gold nanoparticles-decorated zinc oxide nanowire-based nitrogen dioxide gas sensor at room temperature, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 582, part B, pp. 658-668. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.08.082.