УДК 621.382 *Обзор*

Нанокомпозиты оксидов металлов с плазмонными наночастицами для фотокатализаторов и газовых сенсоров

С.С. Налимова[1], З.В. Шомахов[2]

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

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 лит. Ф

[2]ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

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

sskarpova@list.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.696

Аннотация: Увеличение поглощения света в видимой области модифицированных плазмонными наночастицами оксидов металлов делает их отличными материалами для фотокатализаторов и резистивных газовых сенсоров с оптической активацией. Рассмотрены фотокаталитические свойства нанокомпозитов плазмонных наночастиц с оксидами металлов. Проанализированы основные результаты исследования фотокаталитической активности разложения различных органических красителей. Влияние металлических наночастиц на фотокаталитические свойства объясняется формированием барьера Шоттки, а также эффектом локального поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР). Роль барьера Шоттки, образующегося на границе металл-полупроводник, заключается в эффективном разделении и переносе носителей заряда внутренним электрическим полем. Увеличение эффективности фотодеградации красителей связано с разделением электронно-дырочных пар и снижением скорости рекомбинации. За счет ЛППР увеличивается поглощение света, что приводит к увеличению генерации активных носителей заряда. Обобщены результаты, полученные различными авторами, по исследованию отклика композитных структур оксидов металлов с плазмонными наночастицами, к окисляющим и восстанавливающим газам при различных экспериментальных условиях. Основной причиной увеличения отклика является увеличение концентрации адсорбированных ионов кислорода при переходе к ним фотогенерированных в плазмонных наночастицах электронов. Механизм влияния эффекта поверхностного плазмонного резонанса на свойства химических полупроводниковых газовых сенсоров и фотокатализаторов связан с процессами формирования барьера Шоттки при контакте благородного металла и полупроводника, прямого переноса электронов, локального усиления электрического поля и плазмонного резонансного переноса энергии.

Ключевые слова: наночастицы, оксид металла, фотокатализаторы, газовые сенсоры, локализованный поверхностный плазмонный резонанс.

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)»

Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., директор института электроники, робототехники и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Review

Metal oxide nanocomposites with plasmonic nanoparticles for photocatalysts and gas sensors

S.S. Nalimova[1], Z.V. Shomakhov[2]

[1]Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

[2]Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.696

Abstract: The increased absorption of light by metal oxide materials modified with plasmonic nanoparticles in the visible range makes them excellent candidates for use in photocatalysts and light

© С.С. Налимова, З.В. Шомахов, 2025

activated gas sensors. The photocatalytic properties of these nanocomposite materials are studied. The main results of research on the decomposition of various organic dyes using these catalysts are analyzed. The effect of metallic nanoparticles on photocatalytic properties is explained by the formation of a Schottky barrier, as well as the effect of localized surface plasmon resonance (LPPR). The Schottky barrier at the metal-oxide interface efficiently separates and transfers charge carriers through an internal electric field, leading to an increase in photodegradation efficiency. This is achieved by separating electron-hole pairs and reducing the rate of charge carrier recombination. Due to the LPPR, the absorption of light increases, which leads to an increase in the generation of active charge carriers. Various authors have studied the response of composite structures composed of metal oxides and plasmonic nanoparticles to oxidizing and reducing gases under different experimental conditions, and their results have been summarized. The main reason for this increased response is an increase in the concentration of adsorbed oxygen ions due to transfer of photogenerated in plasmonic nanoparticles electrons. Mechanisms of the influence of the surface plasmon resonance effect on the properties of chemical gas sensors and photocatalysts involves the formation of a Schottky barrier when a noble metal contacts a semiconductor, the direct transfer of electrons, a local amplification of the electric field, and the transfer of the plasmon resonance energy.
Keywords: nanoparticles, metal oxide, photocatalysts, gas sensors, localized surface plasmon resonance.

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

Поступила в редакцию/received: 01.07.2025; после рецензирования/revised: 30.08.2025; принята/accepted 05.09.2025.

1. Введение

Композиты плазмонных наночастиц и оксидов металлов благодаря своим свойствам находят применение во многих областях, например, значительно улучшают характеристики фотокатализаторов. Эффект локального поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) наночастиц благородных металлов (золота или серебра) при контакте с полупроводником, используется для разработки фотокатализаторов, активируемых видимым светом [1]. Это позволяет преодолеть такие их недостатки, как низкая эффективность деградации красителя и недостаточная стабильность [2, 3]. Также композиты плазмонных наночастиц и оксидов металлов показали свою эффективность для хранения энергии [4], солнечных элементов [5], оптических сенсоров [6], биосенсоров [7]. Преимущества полупроводниковых оксидов металлов, модифицированных плазмонными наночастицами, используются в экологической сфере также для создания хемосорбционных газовых сенсоров [8, 9].

2. Фотокаталитические свойства оксидов металлов, модифицированных плазмонными наночастицами

Наиболее широко эффект увеличения поглощения света за счет плазмонных наночастиц применяется в фотокатализе. Фотокаталитические

свойства проявляют оксидные материалы, на поверхности которых при воздействии света протекают гетерогенные каталитические реакции, находящие применение, например при разложении органических красителей. В Таблице 1 приведены основные результаты исследования фотокаталитической активности разложения различных органических красителей. Общепринятый механизм фотокаталитического разложения органических красителей следующий. Под действием света на поверхности оксидного материала происходит образование электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне [20]. Фотоэлектроны, взаимодействуя с адсорбированным кислородом, способствуют образованию супероксидных радикалов $\bullet O_2^-$. Молекулы воды вблизи поверхности оксидного материала при участии дырок диссоциируют с образованием активных гидроксильных радикалов ($\bullet OH$). Гидроксильные и супероксидные радикалы реагируют с молекулами органических красителей, адсорбированными на поверхности фотокатализатора. В результате происходит их фотокаталитическая деградация.

Модифицирование металлическими наночастицами приводит к увеличению эффективности разложения красителей. Взаимное расположение энергетических зон и образование контакта между металлом и полупроводником приводит к переходу электронов из оксида к металлическим наночастицам. В результате электронно-дырочные пары разделяются, и скорость рекомбинации снижается. Это приводит к увеличению эффективности фотодеградации.

Влияние металлических наночастиц на фотокаталитические свойства объясняется формированием барьера Шоттки, а также эффектом ЛППР. Роль барьера Шоттки, образующегося на границе металл-полупроводник, заключается в эффективном разделении и переносе носителей заряда внутренним электрическим полем. За счет ЛППР увеличивается поглощение света, что приводит к увеличению генерации активных носителей заряда [21, 22].

Таблица 1. Фотокаталитические свойства оксидов металлов, модифицированных плазмонными наночастицами

Материал	Условия эксперимента	Краситель	Степень деградации, %	Время, мин	Источник
$Au-TiO_2$	Солнечный свет	Метиленовый голубой	95	20	[10]
$Au-ZnO$	Солнечный свет	Метиленовый голубой	100	75	[11]
$Ag@ZnO/WO_3$	Видимый свет (λ>400 нм)	Метиленовый голубой	72	60	[12]
$Ag-TiO_2$	Видимый свет	Метиловый оранжевый	86	180	[13]

$Au-Fe_2O_3$	Солнечный свет	Родамин Б	100	60	[14]
$Au-TiO_2$	Видимый свет	Метиленовый голубой	97	150	[15]
$Ag-TiO_2$	Солнечный свет	Метиленовый голубой	97	40	[16]
		Метиловый оранжевый	94		
$Au-TiO_2$	Видимый свет (λ=550 нм)	Метиленовый голубой	95	135	[17]
$Au-ZnO$	Видимый свет	Метиленовый голубой	98,9	90	[18]
$Ag/Cu-TiO_2$	Видимый свет	Родамин Б	97,93	60	[19]

Увеличение эффективности деградации органических красителей при модифицировании металлическими наночастицами на примере $Ag-TiO_2$ можно объяснить следующим образом [23]. Внутреннее электрическое поле, обусловленное возникновением барьера Шоттки, способствует разделению электронно-дырочных пар, возникающих в TiO_2, что препятствует их рекомбинации. В результате поглощения света и коллективных колебаний электронов в серебряных наночастицах образуются электроны с высокой кинетической энергией. Их энергия позволяет преодолеть барьер Шоттки и перейти к диоксиду титана, так как этот материал имеет высокую плотность состояний в зоне проводимости. При этом внутреннее электрическое поле способствует переходу дырок к серебряным наночастицам. Таким образом, на поверхности $Ag-TiO_2$ достигается высокая концентрация электронов и дырок, что приводит к образованию большего числа супероксидных и гидроксильных радикалов, которые участвуют в реакциях деградации красителей.

Для исследования роли «горячих» электронов в работе [17] проведено исследование деградации метиленового голубого при воздействии ксеноновой лампы с использованием различных фильтров (фильтр широкого пропускания, 400-700 нм, и зеленый фильтр, 520-550 нм). Показано, что при использовании первого фильтра в течение 135 минут достигнута деградация 85% красителя, а при использовании фильтра зеленого света – 95%. Это связано с поглощением зеленого света плазмонными наночастицами и образованием при этом «горячих» электронов.

В [24] показано, что для гибридных структур Ag/ZnO деградация красителя происходит благодаря следующим процессам: прямое восстановление дырками на поверхности оксида цинка, переход электронов из оксида цинка к серебру и образование супероксидных радикалов, а также прямая инжекция электронов из наночастиц серебра в

зону проводимости оксида цинка с последующим их участием в деградации молекул красителя. Причем последний процесс сильнее проявляется для частиц анизотропной формы, поэтому эффективность деградации наногибридов с серебряными проводами была выше, чем с серебряными призмами. А призмы, в свою очередь, оказались более эффективны для фотокатализа, чем сферы.

Показано также, что добавление двух различных металлов (золото и платина) к диоксиду титана приводит к увеличению фотокаталитической активности [25]. Однако при этом достигнута небольшая степень деградации метиленового голубого (~43% за 120 минут). Поглощение фотонов при воздействии видимого света приводит к образованию электронов с высокой энергией в Au наночастицах и их последующему переходу в зону проводимости TiO_2. Так как уровень Ферми платину расположен ниже, чем у золота, то возможен переход электронов от золотых частиц к платине через TiO_2 Эти электроны могут восстанавливать краситель или участвовать в образовании супероксидных радикалов. В то же время, золотые наночастицы, в которых наблюдается недостаток электронов, могут участвовать в окислении красителя или образовании гидроксильных радикалов. Таким образом, модифицирование двумя разными металлами может приводить не только к увеличению поглощения в видимой области, но и повышению эффективности разделения носителей заряда.

3. Оксиды металлов, модифицированные плазмонными наночастицами, для резистивных полупроводниковых газовых сенсоров

В ряде работ проведены исследования влияния плазмонных наночастиц на газочувствительные свойства оксидов металлов [26-28]. Принцип действия резистивных полупроводниковых сенсоров основан на изменении сопротивления оксида металла в результате химических реакций взаимодействия молекул газа с поверхностью материала [29-31]. Характер изменения сопротивления зависит от типа электропроводности полупроводникового оксида металла. Наиболее распространенные оксиды (SnO_2, ZnO, In_2O_3 и др.) являются полупроводниками *n*-типа [32-39]. При нахождении материала в окружающей атмосфере на его поверхности происходит ионосорбция кислорода. При этом преимущественная форма ионов кислорода зависит от рабочей температуры. Ионы O_2^- образуются при температуре ниже 150°C, а O^- и O^{2-} образуются при более высоких температурах. Это приводит к захвату электронов из зоны проводимости полупроводникового оксида и, следовательно, росту сопротивления

полупроводника n-типа. Изменение сопротивления при взаимодействии с целевым газом будет зависеть от его природы. При появлении восстанавливающего газа происходит его окисление за счет реакции с заряженными поверхностными ионами кислорода. В результате электроны возвращаются в зону проводимости полупроводникового оксида, и его сопротивление уменьшается. При взаимодействии с окисляющими газами, например, NO_2, адсорбированные молекулы этих газов выполняют функцию акцептора электронов, что приводит к увеличению сопротивления сенсора. Противоположный отклик наблюдается для металлооксидных полупроводников p-типа.

Поскольку работа стандартных резистивных газовых сенсоров на основе металлооксидных полупроводников определяется генерацией ионов кислорода, обычно требуется нагревать чувствительный элемент до рабочей температуры не менее 150°C. Однако термическая активация газового сенсора имеет ряд недостатков. Для работы чувствительного элемента необходимо добавлять к нему нагревательный элемент, что увеличивает сложность устройства [40]. Высокие рабочие температуры уменьшают срок службы устройства и стабильность параметров отклика при длительной работе [41]. Это также ограничивает применение сенсоров при обнаружении горючих или взрывоопасных веществ, что связано с проблемами безопасности. Таким образом, важной проблемой в области исследований резистивных адсорбционных газовых датчиков является снижение рабочей температуры. Одним из способов достижения этой цели является активация чувствительного материала облучением светом [42].

Разрабатываются способы увеличения эффективности поглощения света. Полосы поглощения плазмонных наночастиц соответствуют видимому излучению, поэтому одним из способов обеспечения работы сенсоров при комнатной температуре и видимом излучении является внедрение металлических плазмонных наночастиц в оксиды металлов.

В Таблице 1 обобщены результаты, полученные различными авторами, по исследованию отклика композитных структур оксидов металлов с плазмонными наночастицами, к окисляющим и восстанавливающим газам при различных экспериментальных условиях, где R_0 – сопротивление сенсора в атмосфере воздуха, R_g – сопротивление сенсора в присутствии целевого газа.

Большое число работ посвящено исследованию сенсорных свойств при детектировании диоксида азота. Так, авторами [43] разработан сенсор NO_2 на основе $Au-ZnO$, работающий при комнатной температуре и освещении видимым светом. Наблюдаемый эффект увеличения отклика объясняется генерацией фотоэлектронов вследствие рассеяния белого

света наночастицами, которое способствует каталитической активации молекул кислорода, а также поглощения света вследствие ЛППР. Также показана возможность селективного детектирования NO_2 при освещении светом с длиной волны 470 нм наночастицами оксида цинка, модифицированными серебром [53]. Механизм увеличения отклика при декорировании серебром объяснен следующим образом. При воздействии света на серебряные наночастицы вследствие поверхностного плазмонного резонанса образуются электроны, которые переходят от серебряных наночастиц в зону проводимости оксида цинка. Они могут захватываться молекулами кислорода, адсорбирующимися на поверхности оксида:

$$O_{2(газ)} + e^{-}(h\nu) \rightarrow O^{-}_{2(адс)}(h\nu)\,.$$

Таблица 1. Газочувствительные свойства оксидов металлов, модифицированных плазмонными наночастицами (КТ – комнатная температура).

Материал	Газ/ концентрация	Условия эксперимента	Отклик	Источник
$ZnO\,/\,Au$	NO_2, 6 мд	КТ, белый свет, ~400 мкВт/см^2	$\left(\left(R_g - R_0\right)/R_0\right) = 0,78$	[43]
$SnO_2 - Ag$	H_2, 500 мд	КТ, зеленый светодиод	$R_0/R_g = 8,5$	[44]
$ZnO - Au$	C_2H_2, 100 мд	КТ, видимый свет (λ=532 нм)	$\left(\left(R_0 - R_g\right)/R_0\right) \sim 0,2$	[45]
$ZnO - Ag$	C_2H_2, 1000 мд	120 °C, видимый свет (λ=530 нм)	$R_0/R_g = 26,2$	[46]
$Au@ZnO@ZIF-8$	$HCHO$, 100 мд	КТ, белый свет	$R_0/R_g \sim 70$	[47]
$Ag - TiO_2$	O_3, 0,1 мд	КТ, синий свет	$R_g/R_0 = 1,004$	[48]
$ZnO - Au$	NO_2, 1 мд	КТ, зеленый свет (λ=520 нм)	$\left(\left(R_g - R_0\right)/R_0\right) = 1,7$	[49]
$In_2O_3\,/\,g-C_3N_4\,/\,Au$	NO_2, 1 мд	КТ, видимый свет	$R_0/R_g = 17,2$	[50]
$AuAg\,/\,ZnO$	CH_4, 5000 мд	КТ, УФ-свет	$R_0/R_g = 62,61$	[51]
$Ag - TiO_2$	C_3H_6O, 100 мд	КТ, белый свет (λ=405 нм)	$\left(R_0 - R_g\right)/R_g = 66,1$	[52]

Молекулы NO_2 захватывают электроны адсорбированных ионов кислорода или электроны из зоны проводимости оксида цинка:

$$NO_{2(gas)} + O^{-}_{2(ads)}(h\nu) \rightarrow NO^{-}_{2(ads)} + O_{2(gas)}\,, \quad NO_{2(gas)} + e^{-} \rightarrow NO^{-}_{2(ads)}(h\nu)\,.$$

Эти реакции приводят к увеличению толщины области обедненного заряда и росту сопротивления. Хотя сродство к электрону у NO_2 (2,27 эВ) больше, чем у O_2 (0,44 эВ), адсорбированные молекулы $NO^{-}_{2(ads)}(h\nu)$ слабо связаны с

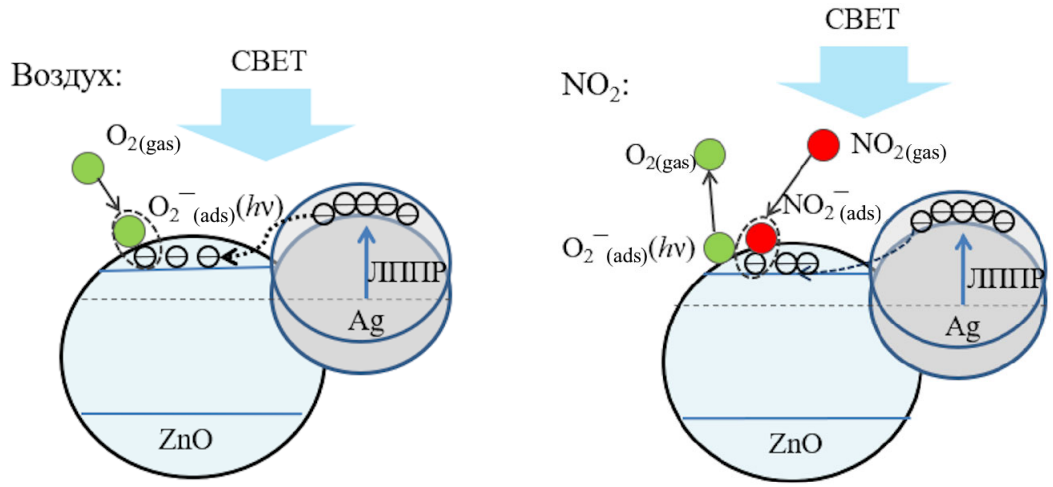
поверхностью и могут легко десорбироваться [54]. Данные процессы обобщены на рис. 1. Рассмотренные явления позволяют заключить, что большую роль в них играют ионосорбированные частицы кислорода. Поэтому поверхностная концентрация адсорбированного кислорода во многом определяет сенсорные характеристики оксидных материалов, в том числе модифицированных плазмонными нанаочастицами.

Декорированные плазмонными наночастицами оксидов металлов перспективны для создания сенсоров восстанавливающих газов. Так, авторами [44] показано, что отклик $Ag-SnO_2$ к водороду при комнатной температуре при освещении зеленым светодиодом увеличивается приблизительно на 33% по сравнению с темновыми условиями. Это увеличение связывают с ионосорбцией кислорода при захвате электронов, генерированных в металлических наночастицах за счет эффекта ЛППР. Они слабо связаны с поверхностью и проявляют большую реакционную способность. Также золотые наночастицы являются катализатором диссоциации водорода.

Обнаружено увеличение отклика полых наносфер $Ag-WO_3$ к этанолу при 230°C и воздействии видимого света [55]. При этом авторами проведено исследование влияния длины волны света на сенсорный отклик к этанолу. Обнаружено, что максимальное увеличение отклика наблюдается при освещении света с длинами волн 405 нм и 900 нм, которые соответствуют поглощению света серебряными наночастицами за счет ЛППР и кислородными вакансиями на поверхности WO_3. В работе [56] увеличение сенсорного отклика $Ag-WO_3$ структур «ядро-оболочка» к этанолу объяснено увеличением толщины области обедненного заряда за счет перехода электронов от оксида вольфрама к серебряным наночастицам.

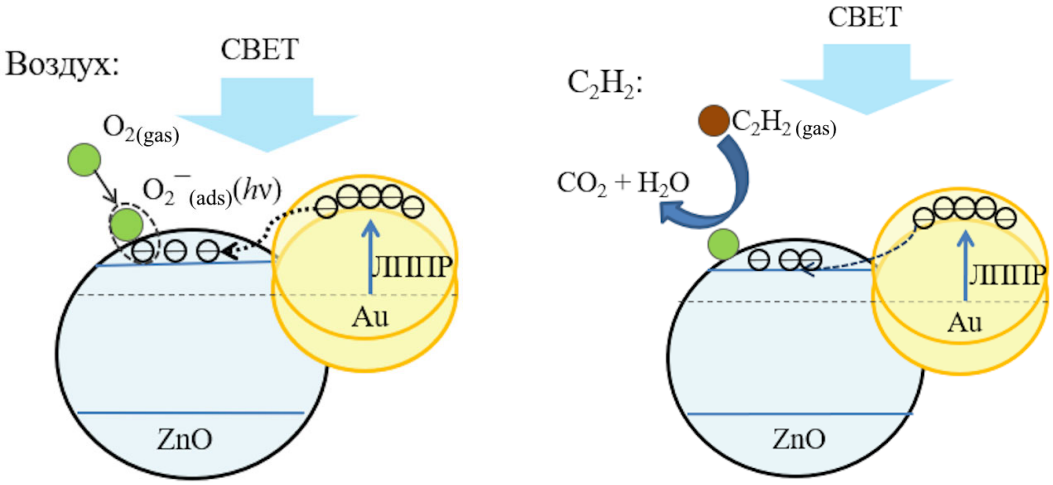
Также авторами [26] показано, что $Au-ZnO$ в темноте проявляют отклик к NH_3, а при освещении видимым светом – к NO_2. Такая селективность, зависящая от внешних воздействий, связана с противоположными направлениями процессов перехода электронов между металлическими наночастицами и оксидом. При освещении зеленым светом отклик к 1 мд NO_2 увеличивается до 4,66, в то время как в темноте он составлял 1,20. Это объясняется тем, что сопротивление структуры уменьшается при освещении. За счет эффекта поверхностного плазмонного резонанса образуются фотогенерированные электроны, которые инжектируются в оксид цинка. Таким образом, при появлении газа-окислителя NO_2 достигается большее относительное изменение сопротивления. В темноте отклик структур $Au-ZnO$ к 1 мд NH_3 составил 3,59, в то время как при освещении зеленым светом его значение было

1,92. Этот экспериментальный факт объяснен влиянием золотых наночастиц, а именно электронной модификацией и каталитическим эффектом. Электроны из оксида цинка могут переходить к золотым наночастицам и способствовать диссоциативной адсорбции кислорода в виде O^-. Уменьшение отклика при освещении связано с природой взоимодействия с восстанавливающими газами. Так, переход фотогенерированных электронов к оксиду цинка приводит к уменьшению его сопротивления, при этом относительное уменьшение сопротивления при взаимодействии с NH_3 становится меньше, чем в темноте.



а б

Рис. 1. Взаимодействие сенсора $ZnO-Ag$ при воздействии света: а – с кислородом, б – с NO_2.



а б

Рис. 2. Взаимодействие сенсора $ZnO-Au$ при воздействии света: а – с кислородом, б – с C_2H_2.

В целом, взаимодействие оксида металла, модифицированного плазмонными металлическими наночастицами, с восстанавливающими газами можно описать следующим образом на примере системы $ZnO-Au$ и C_2H_2 в качестве целевого газа [45]. При воздействии видимого света на

сенсорную структуру $ZnO-Au$ происходит поглощение фотонов золотыми наночастицами и образование горячих электронов и электромагнитного поля. Эти электроны переходят в зону проводимости оксида цинка, преодолевая барьер Шоттки, и взаимодействуют с газообразными молекулами кислорода, приводя к их ионосорбции (см. рис. 2 а).

В отличие от адсорбированных частиц кислорода, захвативших собственные электроны оксида цинка, частицы $O_2^-(h\nu)$, которые образуются при поглощении электронов, перешедших от золотых наночастиц, слабо связаны с поверхностью и легко вступают в химические взаимодействия. Следовательно, молекулы C_2H_2, адсорбируясь на поверхности оксида цинка, окисляются ионами $O_2^-(h\nu)$ (см. рис. 2 б):

$$2C_2H_2 + 3O_2^-(h\nu) \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O + 3e^- .$$

В результате этой реакции электроны возвращаются в зону проводимости оксида цинка, что приводит к уменьшению толщины области обеденнного заряда и падению сопротивления.

Механизм влияния эффекта поверхностного плазмонного резонанса на свойства химических полупроводниковых газовых сенсоров и фотокатализаторов связан с несколькими процессами [57]: – формирование барьера Шоттки при контакте благородного металла и полупроводника; – прямой перенос электронов; – локальное усиление электрического поля; – плазмонный резонансный перенос энергии.

4. Заключение

Рассмотрены фотокаталитические и газочувствительные свойства оксидов металлов, модифицированных плазмонными наночастицами. При взаимодействии таких материалов с органическими красителями происходит эффективная фотодеградация последних под действием видимого света. Основными причинами улучшения фотокаталитических свойств оксидов металлов при модифицировании плазмонными наночастицами являются поглощение света вследствие ЛППР и более эффективное разделение носителей заряда. Рассмотрены примеры газовых сенсоров на основе модифицированных плазмонными наночастицами оксидов металлов. Для этой области применения решающую роль играет увеличение поверхностной концентрации адсорбированных слабо связанных ионов кислорода. Также плазмонные частицы обладают каталитическими свойствами, которые способствуют увеличению отклика рассматриваемых структур.

Библиографический список:

1. **Koppala, S.** Hierarchical ZnO/Ag nanocomposites for plasmon-enhanced visible-light photocatalytic performance / S. Koppala, Y. Xia, L. Zhang et al. // Ceramics International. – 2019. – V. 45. – I. 12. – P. 15116-

15121. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.252.
2. **Muthukumar, P.** Plasmonic nanoparticles doped metal oxide hybrid materials for efficient photocatalytic dye degradation and strong anti-biofilm activity / P. Muthukumar, D. Yuvapriya, D. Selvakumar et al. // Materials Science and Engineering: B. – 2023. – V. 296. – Art. № 116688. – 9 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116688.
3. **Liu, J.** A novel plasmonic Z-scheme photocatalyst for solar-light-driven degradation of naphthalene in seawater: Degradation pathways and mechanism insight / J. Liu, X. Xu, S. Song et al. // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – V. 12. – I. 3. – Art. № 113019. – 16 p. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113019.
4. **Girija, N.** Redox participation and plasmonic effects of Ag nanoparticles in nickel cobaltite-Ag architectures as battery type electrodes for hybrid supercapacitor / N. Girija, S.S. Kuttan, J.P. Jyothibasu et al. // Electrochimica Acta. – 2022. – V. 412.– Art. № 140141. – 13 p. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140141.
5. **Waketola, A.G.** Recent progress in silver and gold nanoparticle-based plasmonic organic solar cells / A.G. Waketola, N.A. Tegegne, F.G. Hone // Plasmonics. – 2025. – V. 20. – P. 5521-5556. DOI: 10.1007/s11468-024-02430-1.
6. **Khodaie, A.** Development of an advanced multimode refractive index plasmonic optical sensor utilizing split ring resonators for brain cancer cell detection / A. Khodaie, H. Heidarzadeh, F.V. Harzand // Scientific Reports. – 2025. – V. 15.– Art. № 433. – 12 p. DOI: 10.1038/s41598-024-84761-x.
7. **Islam, M.A.** Plasmonic biosensors for health monitoring: inflammation biomarker detection / M.A. Islam, J.-F. Masson // ACS Sensors. – 2025. – V. 10. – I. 2. – P. 577–601. DOI: 10.1021/acssensors.4c03562.
8. **Weyrauch, I.** Recent developments in the design of photoactivated metal oxide gas sensors and application of plasmonic nanoparticles in hydrogen-sensing devices / I. Weyrauch, E.L. Hefler, R. Breuch et al. // Physica Status Solidi A. – 2025. – Art. № 2400633. – 16 p. DOI: 10.1002/pssa.202400633.
9. **Drozdowska, K.** Selective light-activation of sensing regions in hybrid Au-graphene-TiO_2 chemiresistive gas sensor / K. Drozdowska, J. Smulko // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2025. – V. 437. – Art. № 137764. – 11 p. DOI: 10.1016/j.snb.2025.137764.
10. **Singh, J.** Facile synthesis, structural and optical properties of Au-TiO_2 plasmonic nanohybrids for photocatalytic applications / J. Singh, K. Sahu, B. Satpati et al. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2019. – V. 135. – Art. № 109100. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jpcs.2019.109100.
11. **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.
12. **Basumatary, B.** Evaluation of Ag@TiO_2/WO_3 heterojunction photocatalyst for enhanced photocatalytic activity towards methylene blue degradation / B. Basumatary, R. Basumatary, A. Ramchiary, D. Konwar // Chemosphere. – 2022. – V. 286. – Part 2. – Art. № 131848. – 9 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131848.
13. **Karimi-Maleh, H.** Tuning of metal oxides photocatalytic performance using Ag nanoparticles integration / H. Karimi-Maleh, B.G. Kumar, S. Rajendran et al. // Journal of Molecular Liquids. – 2022. – V. 314. – Art. № 113588. – 36 p. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113588.
14. **Alp, E.** Plasmon-enhanced photocatalytic and antibacterial activity of gold nanoparticles-decorated hematite nanostructures / E. Alp, R. İmamoğlu, U. Savacı et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – V. 852. – Art. № 157021. – 11 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157021.
15. **Celebi, N.** Ligand-free fabrication of Au/TiO_2 nanostructures for plasmonic hot-electron-driven photocatalysis: Photoelectrochemical water splitting and organic-dye degredation / 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.
16. **Singh, J.** Structural, optical and plasmonic properties of Ag-TiO_2 hybrid plasmonic nanostructures with enhanced photocatalytic activity / J. Singh, B. Satpati, S. Mohapatra // Plasmonics. – 2017. – V. 12. – I. 3. – P. 877-888. DOI: 10.1007/s11468-016-0339-6.
17. **Bamola, P.** Interfacial interaction of plasmonic nanoparticles (Ag, Au) decorated floweret TiO_2 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.
18. **Luyen, N.T.** A robust synthesis of reverse Au/ZnO core/shell nanostructures with high visible photocatalytic activity of methylene blue dye / N.T. Luyen, N.X. Quang, V.T. K. Oanh et al. // RCS Advances. – 2025. – V. 15. – I. 32. – P. 25831-25838. DOI: 10.1039/d5ra03007b.
19. **Wafi, A.** Ultrasonic and vitamin C mediated synthesis of plasmonic Ag-, Cu-, and Ag/Cu-TiO_2 for photocatalytic degradation of Rhodamine B / A. Wafi, L. Roza, G.E. Timuda et al. // Surfaces and Interfaces. – 2025. – V. 72. – Art. № 107135. – 14 p. DOI: 10.1016/j.surfin.2025.107135.

20. **Божинова, А.С.** Изучение фотокаталитических и сенсорных свойств нанокомпозитных слоев ZnO/SiO_2 / А.С. Божинова, Н.В. Канева, И.Е. Кононова и др. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 12. – С. 1662-1666. DOI: 10.1134/S106378261312004X.
21. **Khurgin, J.** Hot-electron dynamics in plasmonic nanostructures: fundamentals, applications and overlooked aspects / J. Khurgin, A.Y. Bykov, A.V. Zayats // eLight. – 2024. – V. 4. – Art. № 15. – 22 p. DOI: 10.1186/s43593-024-00070-w.
22. **Ávila-Segura, V.** Ag nanoparticles in metal oxide highly supportive for photocatalytic and cytotoxic properties: experimental and theoretical analysis / V. Ávila-Segura, E.D. Tecuapa-Flores, C.A. Huerta-Aguilar et al. // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2025. – P. 1-30. DOI: 10.1080/03067319.2025.2513654.
23. **Paul, K.K.** Role of surface plasmons and hot electrons on the multi-step photocatalytic decay by defect enriched $Ag@TiO_2$ nanorods under visible light / K.K. Paul, P.K. Giri // Journal of Physical Chemistry C. – 2017. – V. 121. – I. 36. – P. 20016-20030. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b05328.
24. **Mota, D.R.** Influence of Ag size and shape in dye photodegradation using silver nanoparticle/ZnO nanohybrids and polychromatic light / D.R. Mota, W.D. Martini, D.S. Pellosi // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – V. 30. – I. 20. – P. 57667-57682. DOI: 10.1007/s11356-023-26580-7.
25. **Shuang, S.** Surface plasmon enhanced photocatalysis of Au/Pt-decorated TiO_2 nanopillar arrays / S. Shuang, R. Lv, Z. Xie et al. // Scientific Reports. – 2016. – V. 6. – Art. № 26670. – 8 p. DOI: 10.1038/srep26670.
26. **Wang, J.** Room-temperature gas sensors based on ZnO nanorod/Au hybrids: visible-light-modulated dual selectivity to NO_2 and NH_3 / J. Wang, S. Fan, Y. Xia et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – V. 381. – Art. № 120919. – 9 p. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120919.
27. **Schlicke, H.** Plasmonic particle integration into near-infrared photodetectors and photoactivated gas sensors: toward sustainable next-generation ubiquitous sensing / H. Schlicke, R. Maletz, C. Dornack, A. Fery // Small. – 2024. – V. 20. – I. 48. – Art. № 2403502. – 13 p. DOI: 10.1002/smll.202403502.
28. **Lee, J.** Materials engineering for light-activated gas sensors: insights, advances, and future perspectives / J. Lee, M. Kim, S. Park et al. // Advanced Materials. – 2025. – V. 37. – I. 40. – Art. № e08204. – 32 p. DOI: 10.1002/adma.202508204.
29. **Moshnikov, V.A.** Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors / V.A. Moshnikov, I.E. Gracheva, V.V. Kuznezov et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2010. – V. 356. – I. 37-40. – P. 2020-2025. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030.
30. **Налимова, С.С.** Газочувствительные композитные наноструктуры на основе оксида цинка для детектирования паров органических растворителей / С.С. Налимова, З.В. Шомахов, К.В. Герасимова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 678-687. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678.
31. **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.
32. **Masuda, Y.** Recent advances in SnO_2 nanostructure based gas sensors / Y. Masuda // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2022. – V. 364. – Art. № 131876. – 27 p. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131876.
33. **Sui, N.** Selective ppb-level ozone gas sensor based on hierarchical branch-like In_2O_3 nanostructure / N. Sui, P. Zhang, T. Zhou, T. Zhang // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2021. – V. 336. – Art. № 129612. – 8 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.129612.
34. **Рябко, А.А.** Сенсибилизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками $AgInS_2$ для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией / А.А. Рябко, С.С. Налимова, Д.С. Мазинг и др. // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 845-851. DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52514.15-22.
35. **Буй, К.Д.** Покрытия из наностержней гетероструктуры ZnO/Zn_2SnO_4 для эффективного детектирования ацетона / Буй К.Д., Налимова С.С., Шомахов З.В. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 794-804. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.794.
36. **Nalimova, S.** Sacrificial doping as an approach to controlling the energy properties of adsorption sites in gas-sensitive ZnO nanowires / S. Nalimova, Z. Shomakhov, A. Bobkov, V. Moshnikov // Micro. – 2023. – V. 3. – I. 2. – P. 591-601. DOI: 10.3390/micro3020040.
37. **Рябко, А.А.** Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации / А.А. Рябко, А.А. Бобков, С.С. Налимова и др. // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – Вып. 5. – С. 758-764. DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21.
38. **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.

39. **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/EExPolytech.2018.8564407.
40. **Raju, P.** Review – semiconductor materials and devices for gas sensors / P. Raju, Q. Li // Journal of Electrochemical Society. – 2022. – V. 169. – I. 5. – Art. № 057518. – 37 p. DOI: 10.1149/1945-7111/ac6e0a.
41. **Krishna, K.G.** Nanostructured metal oxide semiconductor-based gas sensors: a comprehensive review / K.G. Krishna, S. Parne, N. Pothukanuri et al. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2022. – V. 341. – Art. № 113578. – 17 p. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113578.
42. **Wang, J.** Light-activated room-temperature gas sensors based on metal oxide nanostructures: a review on recent advances / J. Wang, H. Shen, Y. Xia, S. Komarneni // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – I. 6. – P. 7353-7368. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.11.187.
43. **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. 7. – P. 12071–12080. DOI: 10.1021/acsomega.9b01116.
44. **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. // Journal of Physical Chemistry C. – 2018. – V. 122. – I. 9. – P. 5026-5031. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b09807.
45. **Zheng, Z.Q.** Light-controlled C_2H_2 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.
46. **Iftekhar 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. Iftekhar Uddin, G.S. Chung // Journal of Electroceramics. – 2018. – V. 40. – I. 1. – P.42-49. DOI: 10.1007/s10832-017-0096-8.
47. **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.
48. **Lo, T.-H.** The response of UV/blue light and ozone sensing using Ag-TiO_2 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.
49. **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 // Journal of Colloid and Interface Science. – 2021. – V. 582. – Part B. – P. 658-668. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.08.082.
50. **Han, C.** In_2O_3/g-C_3N_4/Au ternary heterojunction-integrated surface plasmonic and charge-separated effects for room-temperature ultrasensitive NO_2 detection / C. Han, X. Li, J. Liu et al. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2022. – V. 371. – Art. № 132448. – 9 p. DOI: 10.1016/j.snb.2022.132448.
51. **Sun, X.** UV-activated AuAg/ZnO microspheres for high-performance methane sensor at room temperature / X. Sun, Y. Zhang, Y. Wang et al. // Ceramics International. – 2024. – V. 50. – I. 17. – P. 30552-30559. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.05.352.
52. **Sun, Z.** LSPR effect enabled Ag-TiO_2 nanotube arrays for high sensitivity and selectivity detection of acetone under visible light / Z. Sun, J. Cao, S. Wang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – V. 1003. – Art. № 175533. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175533.
53. **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.
54. **Zhang, C.** Role of oxygen vacancy in tuning of optical, electrical and NO_2 sensing properties of ZnO_{1-x} coatings at room temperature / C. Zhang, X. Geng, J. Li et al. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2017. – V. 248. – P. 886–893. DOI: 10.1016/j.snb.2017.01.105.
55. **Yao, Y.** Ag nanoparticle-sensitized WO_3 hollow nanosphere for localized surface plasmon enhanced gas sensors / Y. Yao, F. Ji, M. Yin et al. // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2016. – V. 8. – I. 28. – P. 18165-18172. DOI: 10.1021/acsami.6b0469.
56. **Xu, L.** Ag_x@WO_3 core-shell nanostructure for LSP enhanced chemical sensors / L. Xu, M.L. Yin, S. (Frank) Liu // Scientific Reports. – 2014. – V. 4. – Art. № 6745. – 7 p. DOI: 10.1038/srep06745.
57. **Khanam, S.** A photocatalytic hydrolysis and degradation of toxic dyes by using plasmonic metal–semiconductor heterostructures: a review / S. Khanam, S.K. Rout // Chemistry. – 2022. – V. 4. – I. 2. – P. 454-479. DOI: 10.3390/chemistry4020034.

References:

1. Koppala S., Xia Y., Zhang L. et al. Hierarchical ZnO/Ag nanocomposites for plasmon-enhanced visible-light photocatalytic performance, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, issue 12, pp. 15116-15121. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.252.
2. Muthukumar P., Yuvapriya D., Selvakumar D. et al. Plasmonic nanoparticles doped metal oxide hybrid materials for efficient photocatalytic dye degradation and strong anti-biofilm activity, *Materials Science and Engineering: B*, 2023, vol. 296, art. no 116688, 9 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116688.
3. Liu J., Xu X., Song S. et al. A novel plasmonic Z-scheme photocatalyst for solar-light-driven degradation of naphthalene in seawater: Degradation pathways and mechanism insight, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, vol. 12, issue 3, art. no 113019, 16 p. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113019.
4. Girija N., Kuttan S.S., Jyothibasu J.P. et al. Redox participation and plasmonic effects of Ag nanoparticles in nickel cobaltite-Ag architectures as battery type electrodes for hybrid supercapacitor, *Electrochimica Acta*, 2022, vol. 412, art. no 140141, 13 p. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140141.
5. Waketola A.G., Tegegne N.A., Hone F.G. recent progress in silver and gold nanoparticle-based plasmonic organic solar cells, *Plasmonics*, 2025, vol. 20, pp. 5521-5556. DOI: 10.1007/s11468-024-02430-1.
6. Khodaie A., Heidarzadeh H., Harzand F.V. Development of an advanced multimode refractive index plasmonic optical sensor utilizing split ring resonators for brain cancer cell detection, *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. no 433, 12 p. DOI: 10.1038/s41598-024-84761-x.
7. Islam M.A., Masson J.-F. Plasmonic biosensors for health monitoring: inflammation biomarker detection, *ACS Sensors*, 2025, vol. 10, issue 2, pp. 577-601. DOI: 10.1021/acssensors.4c03562.
8. Weyrauch I., Hefler E.L., Breuch R. et al. Recent developments in the design of photoactivated metal oxide gas sensors and application of plasmonic nanoparticles in hydrogen-sensing devices, *Physica Status Solidi A*, 2025, art. no 2400633, 16 p. DOI: 10.1002/pssa.202400633.
9. Drozdowska K., Smulko J. Selective light-activation of sensing regions in hybrid Au-graphene-TiO_2 chemiresistive gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, vol. 437, art. no 137764, 11 p. DOI: 10.1016/j.snb.2025.137764.
10. Singh J., Sahu K., Satpati B. et al. Facile synthesis, structural and optical properties of Au-TiO_2 plasmonic nanohybrids for photocatalytic applications, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2019, vol. 135, art. no 109100, 12 p. DOI: 10.1016/j.jpcs.2019.109100.
11. 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.
12. Basumatary B., Basumatary R., Ramchiary A., Konwar D. Evaluation of Ag@TiO_2/WO_3 heterojunction photocatalyst for enhanced photocatalytic activity towards methylene blue degradation, *Chemosphere*, 2022, vol. 286, part 2, art. no 131848, 9 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131848.
13. Karimi-Maleh H., Kumar B.G., Rajendran S. et al. Tuning of metal oxides photocatalytic performance using Ag nanoparticles integration, Journal of Molecular Liquids, 2022, vol. 314, art. no 113588, 36 p. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113588.
14. Alp E., İmamoğlu R., Savacı U. et al. Plasmon-enhanced photocatalytic and antibacterial activity of gold nanoparticles-decorated hematite nanostructures, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 852, art. no 157021, 11 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157021.
15. Celebi N., Aydin M.Y., Soysal F. et al. Ligand-free fabrication of Au/TiO_2 nanostructures for plasmonic hot-electron-driven photocatalysis: Photoelectrochemical water splitting and organic-dye degredation, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 860, art. no 157908, 13 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157908.
16. Singh J., Satpati B., Mohapatra S. Structural, optical and plasmonic properties of Ag-TiO_2 hybrid plasmonic nanostructures with enhanced photocatalytic activity, *Plasmonics*, 2017, vol. 12, issue 3, pp. 877-888. DOI: 10.1007/s11468-016-0339-6.
17. Bamola P., Sharma M., Dwivedi C. et al. Interfacial interaction of plasmonic nanoparticles (Ag, Au) decorated floweret TiO_2 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.
18. Luyen N.T., Quang N.X., Oanh V.T.K. et al. A robust synthesis of reverse Au/ZnO core/shell nanostructures with high visible photocatalytic activity of methylene blue dye, *RCS Advances,* 2025, vol. 15, issue 32, pp. 25831-25838. DOI: 10.1039/d5ra03007b.
19. Wafi A., Roza L., Timuda G.E. et al. Ultrasonic and vitamin C mediated synthesis of plasmonic Ag-, Cu-, and Ag/Cu-TiO_2 for photocatalytic degradation of Rhodamine B, *Surfaces and Interfaces*, 2025, vol. 72, art. no 107135, 14 p. DOI: 10.1016/j.surfin.2025.107135.

20. 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.
21. Khurgin J., Bykov A.Y., Zayats A.V. Hot-electron dynamics in plasmonic nanostructures: fundamentals, applications and overlooked aspects, *eLight*, 2024, vol. 4, art. no 15, 22 p. DOI: 10.1186/s43593-024-00070-w.
22. Ávila-Segura V., Tecuapa-Flores E.D., Huerta-Aguilar C.A. et al. Ag nanoparticles in metal oxide highly supportive for photocatalytic and cytotoxic properties: experimental and theoretical analysis, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2025, pp. 1-30. DOI: 10.1080/03067319.2025.2513654.
23. Paul K.K., Giri P.K. Role of surface plasmons and hot electrons on the multi-step photocatalytic decay by defect enriched Ag@TiO_2 nanorods under visible light, *Journal of Physical Chemistry C*, 2017, vol. 121, issue 36, pp. 20016-20030. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b05328
24. Mota D.R., Martini W.D., Pellosi D.S. Influence of Ag size and shape in dye photodegradation using silver nanoparticle/ZnO nanohybrids and polychromatic light, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, issue 20, pp. 57667-57682. DOI: 10.1007/s11356-023-26580-7.
25. Shuang S., Lv R., Xie Z. et al. Surface plasmon enhanced photocatalysis of Au/Pt-decorated TiO_2 nanopillar arrays, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, art. no 26670, 8 p. DOI: 10.1038/srep26670.
26. Wang J., Fan S., Xia Y. et al. Room-temperature gas sensors based on ZnO nanorod/Au hybrids: visible-light-modulated dual selectivity to NO2 and NH3, *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 381, art. no 120919, 9 p. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120919.
27. Schlicke H., Maletz R., Dornack C., Fery A. Plasmonic particle integration into near-infrared photodetectors and photoactivated gas sensors: toward sustainable next-generation ubiquitous sensing, *Small*, 2024, vol. 20, issue 48, art. no 2403502, 13 p. DOI: 10.1002/smll.202403502.
28. Lee J., Kim M., Park S. et al. Materials engineering for light-activated gas sensors: insights, advances, and future perspectives, *Advanced Materials*, 2025, vol. 37, issue 40, art. no e08204, 32 p. DOI: 10.1002/adma.202508204.
29. Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Kuznezov V.V. et al. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, vol. 356, issue 37-40, pp. 2020-2025. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030.
30. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Gerasimova K.V. et al. Gazochuvstvitel'nye kompozitnye nanostruktury na osnove oksida tsinka dlya detektirovaniya parov organicheskikh rastvoritelej [Gas-sensitive composite nanostructures based on zinc oxide for detecting organic solvent vapors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2022, issue 14, pp. 678-687. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678.
31. 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.
32. Masuda Y. Recent advances in SnO_2 nanostructure based gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 364, art. no 131876, 27 p. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131876.
33. Sui N., Zhang P., Zhou T., Zhang T. Selective ppb-level ozone gas sensor based on hierarchical branch-like In2O3 nanostructure, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 336, art. no 129612, 8 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.129612.
34. Ryabko A.A., Nalimova S.S., Mazing D.S. et al. Sensitization of ZnO nanorods by $AgInS_2$ colloidal quantum dots for adsorption gas sensors with light activation, *Technical Physics*, 2022, vol. 67, issue 6, pp. 717-722. DOI: 10.21883/TP.2022.06.54418.15-22.
35. Bui C.D., Nalimova S.S., Shomakhov Z.V. et al. Pokrytiya iz nanosterzhnej geterostruktury ZnO/Zn_2SnO_4 dlya effektivnogo detektirovaniya atsetona [ZnO/Zn_2SnO_4 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.
36. Nalimova S., Shomakhov Z., Bobkov A., Moshnikov V. Sacrificial doping as an approach to controlling the energy properties of adsorption sites in gas-sensitive ZnO nanowires, *Micro*, 2023, vol. 3, issue 2, pp. 591-601. DOI: 10.3390/micro3020040.
37. Ryabko A.A., Bobkov A.A., Nalimova S.S. et al. Gas sensitivity of nanostructured coatings based on zinc oxide nanorods under combined activation, *Technical Physics*, 2022, vol. 67, issue 5, pp. 644-649. DOI: 10.21883/TP.2022.05.53683.314-21.
38. 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.
39. 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/EExPolytech.2018.8564407.
40. Raju P., Li Q. Review – semiconductor materials and devices for gas sensors, *Journal of Electrochemical Society*, 2022, vol. 169, issue 5, art. no 057518, 37 p. DOI: 10.1149/1945-7111/ac6e0a.
41. Krishna K.G., Parne S., Pothukanuri N. et al. Nanostructured metal oxide semiconductor-based gas sensors: a cmprehensive review, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, vol. 341, art. no 113578, 17 p. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113578.
42. Wang J., Shen H., Xia Y., Komarneni S. Light-activated room-temperature gas sensors based on metal oxide nanostructures: a review on recent advances, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, issue 6, pp. 7353-7368. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.11.187.
43. 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 7, pp. 12071-12080. DOI: 10.1021/acsomega.9b01116.
44. 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, *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, vol. 122, issue 9, pp. 5026-5031. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b09807.
45. Zheng Z.Q., Wang B., Yao J.D., Yang G.W. Light-controlled C_2H_2 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.
46. Iftekhar 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.
47. 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.
48. Lo T.-H., Shih P.-Y., Wu C.-H. The response of UV/blue light and ozone sensing using Ag-TiO_2 planar nanocomposite thin film, *Sensors*, 2019, vol. 19, issue 23, art. no 5061, 10 p. DOI: 10.3390/s19235061.
49. Kim D.W., Park K.H., Lee S.-H. 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.
50. Han C., Li X., Liu J. et al. In_2O_3/g-C_3N_4/Au ternary heterojunction-integrated surface plasmonic and charge-separated effects for room-temperature ultrasensitive NO_2 detection, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 371, art. no 132448, 9 p. DOI: 10.1016/j.snb.2022.132448.
51. Sun X., Zhang Y., Wang Y. et al. UV-activated AuAg/ZnO microspheres for high-performance methane sensor at room temperature, *Ceramics International*, 2024, vol. 50, issue 17, pp. 30552-30559. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.05.352.
52.Sun Z., Cao J., Wang S. et al. LSPR effect enabled Ag-TiO_2 nanotube arrays for high sensitivity and selectivity detection of acetone under visible light, *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1003, art. no 175533, 12 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175533.
53. 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.
54. Zhang C., Geng X., Li J. et al. Role of oxygen vacancy in tuning of optical, electrical and NO_2 sensing properties of ZnO_{1-x} coatings at room temperature, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 248, pp. 886-893. DOI: 10.1016/j.snb.2017.01.105.
55. Yao Y., Ji F., Yin M. et al. Ag nanoparticle-sensitized WO_3 hollow nanosphere for localized surface plasmon enhanced gas sensors, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2016, vol. 8, issue 28, pp. 18165-18172. DOI: 10.1021/acsami.6b0469.
56. Xu L., Yin M.L., Liu (Frank) S. Ag_x@WO_3 core-shell nanostructure for LSP enhanced chemical sensors, *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, art. no 6745, 7 p. DOI: 10.1038/srep06745.
57. Khanam S., Rout S.K. A photocatalytic hydrolysis and degradation of toxic dyes by using plasmonic metal–semiconductor heterostructures: a review, *Chemistry*, 2022, vol. 4, issue 2, pp. 454-479. DOI: 10.3390/chemistry4020034.