

Статья

Высокоэффективный фотокатализ розы, управляемый видимым светом

Производство бенгальских красителей и водорода с использованием Ag@Cu/TiO_2

Тройные наноконпозиты

Сатиш Ядав ¹, Асим Джилани ² , Сарика Сачан и ¹, Прамод Кумар ^{1,*}, Саджид Али Ансари ³ , Мухаммад Афзал ⁴
 Мохаммад Омаиш Ансари ^{2,*} 

- ¹ Лаборатория функциональных материалов, химический факультет, профессор Раджендра Сингх (Раджу Бхайя), Институт физических наук для изучения и исследований, Университет Вира Бахадур Сингха Пурванчала, Джаунпур 222003, Уттар-Прадеш, Индия; sarikasachan27aug@gmail.com (CC)
- ² Центр нанотехнологий, Университет короля Абдель Азиза, Джидда, 21589, Саудовская Аравия; asim.jilane@gmail.com Факультет
- ³ физики, Научный колледж, Университет короля Фейсала, почтовый ящик 400, Аль-Акса 31982, Саудовская Аравия; sansari@kfu.edu.sa
- ⁴ Департамент фармацевтических наук, фармацевтическая программа, Медицинский колледж Баттерджи, почтовый ящик 6231, Джидда 21442, Саудовская Аравия; mohammad.afzal@bmc.edu.sa
- * Адрес для переписки: pkchemistry.2009@gmail.com (ПК); moansari@kau.edu.sa (MOA)

Аннотация: В этой работе тройной наноконпозит Ag@Cu/TiO_2 был синтезирован с помощью простой химической методики и впоследствии изучен на предмет фотокаталитической деградации красителя бенгальского розового (RB) под действием видимого света, а также образования из него водорода. Форма, размер и топографический анализ с помощью сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии показали, что все компоненты хорошо интеркалированы и находятся в нанодиапазоне. Энергодисперсионный рентгеноструктурный анализ Ag@Cu/TiO_2 показал наличие Ti, O, Cu и Ag и отсутствие каких-либо других примесей, а картографический анализ показал их равномерное распределение. Рентгеновская фотонная спектроскопия также показала успешное взаимодействие между компонентами. Кроме того, были исследованы изменения химического состояния Ti^{2p} . С использованием соотношений Тауца ширина запрещенной зоны Ag@Cu/TiO_2 оказалась самой низкой при 2,86 эВ по сравнению с чистым TiO_2 (3,28 эВ), бинарным Ag/TiO_2 (3,13 эВ) и Cu/TiO_2 (3,00 эВ). Ag@Cu/TiO_2 продемонстрировал самую низкую интенсивность фотoluminesценции, что предполагает самую высокую эффективность разложения и самую низкую скорость рекомбинации. Применение Ag@Cu/TiO_2 для фотокаталитической деградации красителя RB показало скорость деградации ~81,07%, что превышает эффективность чистого TiO_2 в 3,31 раза. Помимо этого, было обнаружено, что производство ¹, предполагая, что медь и серебро внесли синергический вклад, что привело к водороду Ag@Cu/TiO_2 составляет 17,1 мкмоль ч⁻¹ г, что превышает увеличение производства водорода чистого TiO_2 .

Ключевые слова: краситель бенгальская роза; видимая область; фотокаталитическая деградация; Тройные наноконпозиты Ag@Cu/TiO_2



Цитирование: Ядав, С.; Джилани, А.; Сачан, С.; Кумар, П.; Ансари, ЮАР; Афзал, М.; Ансари, М.О. Высокоэффективный фотокатализ красителя бенгальской розы и производства водорода с использованием видимого света с использованием тройных наноконпозитов Ag@Cu/TiO_2 . Химия 2024, 6, 489–505. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030028>

Академические редакторы: Джангвидо Рамис, Винченцо Вайано и Ольга Сакко

Поступила: 15 апреля 2024 г.

Пересмотрено: 29 мая 2024 г.

Принято: 30 мая 2024 г.

Опубликовано: 20 июня 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и

условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/).

1. Введение

Вода является важным элементом для выживания жизни на Земле и присутствует на Земле в виде рек, морей, озер и грунтовых вод. Быстрый рост населения, развитие, промышленная революция и изменение климата загрязнили все аспекты водных ресурсов [1]. Основными загрязнителями воды являются кожевенная промышленность, кожа, резина, красители, косметика, пищевые фармацевтические препараты, типографские краски и т. д. [2,3]. Среди них текстильная, фармацевтическая, полиграфическая и тканевая промышленность сбрасывают в водоемы до 17–20% цветных красителей, что приводит к загрязнению воды [4]. Синтетические цветные красители не биоразлагаемы и обладают высокой фотостабильностью [5]. Краситель подавляет солнечный свет, снижает растворимость молекулярного кислорода в воде, что влияет на водную жизнь организмов, а также на водную экосистему и оказывает долгосрочное токсическое и канцерогенное воздействие.

Одним из наиболее широко используемых органических красителей является краситель бенгальской розы (RB), который используется в текстильной, полиграфической и косметической фотохимической промышленности. Его необходимо удалять из воды, поскольку он вызывает зуд, покраснение, воспаление, раздражение и образование волдырей при прямом контакте с кожей. В последнее время для разложения загрязнений красителями используются различные методы, включая мембранную фильтрацию, коагуляцию, флокуляцию и адсорбцию. Однако все эти методы имеют ограничения, включая сточные воды, образование осадка и трудности с реактивацией адсорбента. Фотокатализ — один из наиболее распространенных и экономически эффективных методов разложения красителей РБ из воды с использованием эффективных нанокатализаторов [9]. Фотокатализ видимого света — это процесс, в котором энергия видимого света используется для инициирования химической реакции. Он предполагает использование фотокатализатора, способного поглощать свет видимого спектра и способствовать превращению реагентов в желаемый продукт [10].

В последнее время этот метод вызвал большой интерес благодаря своей экологичности, универсальности, селективности, эффективности, экономичности и устойчивости, что делает его широко применимым для широкого спектра применений.

Наночастицы проявляют свойства, отличные от объемных материалов, молекулярных разновидностей или атомов, из которых они получены, из-за высокого отношения поверхностного объема [11]. Различные типы наночастиц переходных металлов [12], оксидов и халькогенидов переходных металлов используются для различных применений, таких как хранение энергии, хранение магнитных данных, датчики и феррожидкости, а также фотокаталитическая деградация органических красителей. Наночастицы, особенно наночастицы оксидов металлов, широко используются в области фотокатализа видимого света. Эти наночастицы обладают уникальными свойствами, которые делают их эффективными в фотокатализе различных реакций. Например, наночастицы оксидов металлов, таких как оксид титана (TiO₂) [13], оксид цинка (ZnO) [14] и оксид вольфрама (WO₃) [15], широко изучались на предмет их фотокаталитических способностей. Однако у использования наночастиц для фотокатализа есть определенные недостатки, такие как их большая запрещенная зона и требование, чтобы ширина запрещенной зоны фотокатализатора соответствовала энергии фотонов видимого света, чтобы достичь эффективного фотокатализа в видимом свете. К сожалению, многие наночастицы оксидов металлов имеют запрещенную зону, которая соответствует ультрафиолетовому (УФ-видимому) свету, что ограничивает их фотокаталитическую активность в видимом свете. В процессе фотокатализа наночастицы могут агломерироваться, что приводит к уменьшению площади поверхности, а также к ограничению доступных реакционно-активных центров. Эта агрегация может происходить из-за различных факторов, таких как высокая концентрация, изменение pH или наличие примесей [16]. Чтобы преодолеть это ограничение, исследователи разработали различные стратегии, такие как легирование, модификация поверхности и изменение запрещенной зоны, чтобы активировать наночастицы оксидов металлов при освещении видимым светом. Эти модификации позволяют наночастицам поглощать более широкий спектр света, включая видимый свет, тем самым улучшая их фотокаталитическую эффективность [17]. Многочисленные оксиды переходных металлов, такие как ZnO, TiO₂, NiO и CuO, а также халькогениды металлов, такие как ZnS и MoS₂, использовались для удаления цветных красителей, промышленных загрязнителей и фармацевтических водных отходов [18–20]. Наиболее изученным оксидом переходного металла для фотокаталитического разложения загрязнений, а также красителя является TiO₂, который обладает сильной окислительной способностью, нетоксичен и чрезвычайно устойчив как к фото-, так и к химической коррозии. Фотокатализ является перспективным методом, поскольку он недорог и экологичен. TiO₂ имеет ширину запрещенной зоны 3,2 эВ и поглощает длины волн от 360 до 380 нм в УФ-Вид области.

Некоторые исследования показывают уменьшение запрещенной зоны TiO₂ за счет легирования новыми переходными металлами, такими как Cu, Ag, Au, Pt, Ni и Co, а также полианилин (PANI), полипиррол (PPY) и восстановленный оксид графена, что расширяет возможности спектральный сдвиг в видимой области и увеличивает фотокаталитическую активность TiO₂ [21]. Показано, что метиловый синий (МБ) и метилоранж (МО) под действием УФ-Вид-излучения деградируют на 96,3% и 97% с использованием TiO₂, синтезированного модифицированным сольватермическим методом. Лин и др. [22] продемонстрировали фотокаталитическое разложение (УФ-ВИД) токсичного 2-хлорфенола с использованием катализатора TiO₂. Аналогичным образом, Чжан и др. [23] исследовали фотоэлектрический эффект и фотокаталитические свойства TiO₂ путем легирования его наночастицами Ag для усиления фотоэлектрической и фотокаталитической деградации. Минсюань Сунь и др. [24] показали значительное улучшение видимой

область фотокаталитической активности, фотохимической стабильности и низкозарядовой рекомбинации из TiO_2 , легированного CdS и CdS/MoS_2 .

На основе вышеизложенного нами синтезированы тройные композиты $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ сольвотермическим методом *in situ* для фотокаталитической деградации красителя RB в видимой области света. Синтезированный тройной композит $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ охарактеризован по структурным и морфологическим характеристикам. Наконец, были глубоко исследованы фотокаталитическая деградация красителя RB и явление выделения водорода в видимой области.

2. Экспериментальный

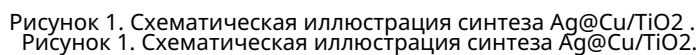
раздел 2.1. Материалы и методы

Титан (IV)-изопропоксид (TIP) 97 % от Qualigens, пентагидрат сульфата меди (II) 99,5 % ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) от Sisco Research Laboratories, нитрат серебра 99,8 % (AgNO_3) от Sigma Aldrich, аскорбиновая кислота 99,7 % от Sisco Research Laboratories, боргидрид натрия 98 % (NaBH_4) от Sisco Research Laboratories, соляная кислота 35 % (HCl) от Sisco Research Laboratories (Мумбаи, Индия) и краситель из бенгальской розы (RB) от Sigma Aldrich (Сент-Луис), Миссури, США) были использованы в этом исследовании. В качестве реакционной среды для процедуры синтеза использовали деионизированную воду.

Для изучения морфологии поверхности и элементного состава использовалась полевая эмиссионная сканирующая электронная микроскопия (JEOL, JSM-7600F, FESEM, Токио, Япония). Также использовалась трансмиссионная электронная микроскопия (JEOL, JSM, ARM-200F, HRTEM, Токио, Япония). Картирование элементов было записано с использованием энергодисперсионного рентгеновского спектрометра (EDS) от Oxford Instruments, Оксфордшир, Великобритания, оснащенного FESEM. Для обнаружения элементов использовали рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (XPS) (ESCALAB 250 от Thermo Fisher Scientific, Уоррингтон, Великобритания) на монохроматизированном источнике рентгеновского излучения $\text{Al K}\alpha$ λ 1/4 1486,6 эВ.

2.2. Синтез $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$

Синтез $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ проводился сольвотермическим методом. В этом методе 6 мл изопропанола диспергировали в 86 мл воды и к нему по каплям добавляли 6 мл HCl . К смеси изопропанола и кислоты медленно добавляли 5 мл TIP и всю смесь помещали в условия перемешивания при 80 °C в течение 1 часа, в результате чего получался белый коллоидный раствор (называемый раствором А). Этот белый коллоидный раствор подвергали центрифугированию, а затем собранный TiO_2 промывали избытком растворителей (смесь воды и этанола) и окончательно сушили в воздушной печи при 80 °C в течение 6 часов с получением чистого TiO_2 . Cu/TiO_2 готовили растворением 0,4 г $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в 100 мл (при ~5%-ном содержании Cu по TiO_2) воды и использованием 0,05 М NaOH для поддержания pH на уровне 12. К указанному выше раствору $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ по каплям добавляли 30 мл 0,05 М аскорбиновой кислоты и полученный продукт нагревали при 60 °C при непрерывном перемешивании. Желтый цвет смеси медленно менялся на коричневый, что указывает на образовавшуюся Cu (дисперсию Cu назвали раствором В). В конечном итоге оба раствора (А и В) смешивали при непрерывном перемешивании и полученный Cu/TiO_2 подвергали центрифугированию, промывали избытком растворителей (воды и этанола) и окончательно сушили при 80 °C в течение 6 часов с получением $\text{Cu} \cdot \text{TiO}_2$. $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ готовили, сначала готовя коллоидный раствор наночастиц Ag растворением 0,12 г AgNO_3 в 100 мл H_2O , а затем к нему по каплям добавляли 30 мл 0,06 М NaBH_4 . Бинарный композит Cu/TiO_2 добавляли к коллоидному раствору Ag и всю смесь непрерывно перемешивали в течение 2 часов. Таким образом, приготовленный композит $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ промывали избытком растворителей (воды и этанола) и окончательно сушили при 80 °C в течение 6 ч с получением чистого $\text{Ag}@\text{Cu}/\text{TiO}_2$.



2.3. Фотокаталитическая деградация РБ и производство водорода

[illegible]

Эффективность разложения чистого TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂ рассчитывалась по следующему уравнению [25].

$$\text{Деградация (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100 \quad (1)$$

В приведенном уравнении C_0 представляет собой начальную концентрацию красителя RB, а C_t означает концентрацию RB через определенный интервал времени (0, 20, 40 и 60 минут). После этого кажущуюся константу скорости (k) определяли с использованием следующего уравнения.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (2)$$

Для оценки производства водорода в качестве поглотителя использовали метанол. В процессах производства водорода поглотители играют решающую роль в повышении эффективности. Они решают ключевые проблемы, захватывая электрон-дырочные пары и не позволяя им тратить генерируемую энергию [1]. Кроме того, поглотители избирательно нацеливаются и уничтожают молекулы, участвующие в нежелательных побочных реакциях, защищая важнейшие промежуточные соединения, необходимые для выделения водорода. Кроме того, они могут облегчить перемещение фотогенерированных зарядов внутри системы, обеспечивая их эффективное использование для производства водорода. По сути, мусорщики действуют как стражи, оптимизируя различные аспекты процесса для максимизации производства водорода [2].

3. Результат и обсуждение

3.1. Морфологический анализ

поверхности Морфологический анализ TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂ был выполнен с помощью SEM (рис. 2) и TEM (рис. 3). СЭМ чистого TiO₂ показывает скопления круглых частиц небольшого размера, упакованных в мелкие и крупные агрегаты. Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂ имеют схожую морфологию, причем все компоненты находятся в нанодиапазоне. По микрофотографиям можно предсказать, что все компоненты Ag@Cu/TiO₂ хорошо интеркалированы друг с другом. Изображения Ag@Cu/TiO₂, полученные методом ПЭМ, показывают, что все TiO₂, Cu и Ag хорошо интеркалированы друг с другом, при этом размер некоторого количества TiO₂ составляет чуть более 100 нм.

Элементный анализ TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂ методом ЭДС показывает наличие Ti и O в TiO₂, Ti, O и Ag в Ag/TiO₂, Cu, Ti и O в Cu/TiO₂ и Cu, Ti, O и Ag в Ag@Cu/TiO₂, что свидетельствует об успешном формировании композита, а также об отсутствии каких-либо примесей. Равномерное распределение соответствующих элементов, как показано в результате картографического анализа (рис. 4), свидетельствует об эффективности методологии синтеза.

3.2. Поверхностный и химический анализ.

Элементный состав и функциональные группы полученных катализаторов (чистые TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂) изучены методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Обзорные спектры (рис. 5а) позволили получить представление о поверхностных элементах, а обнаруженный состав проиллюстрирован на рис. 5б. Чистый TiO₂ имел состав, содержащий 58,1% кислорода и 41,9% титана. В случае Ag/TiO₂ элементы присутствовали в процентном соотношении: 51,7% кислорода, 45,3% титана и 3,0% серебра. Аналогичным образом было подтверждено включение меди в Cu/TiO₂ с составом 50,7% кислорода, 43,0% титана и 6,3% меди. Тройной нанокompозит, называемый Ag@Cu/TiO₂, имел элементный состав: 35,4% кислорода, 39,2% титана, 16,7% серебра и 8,7% меди.

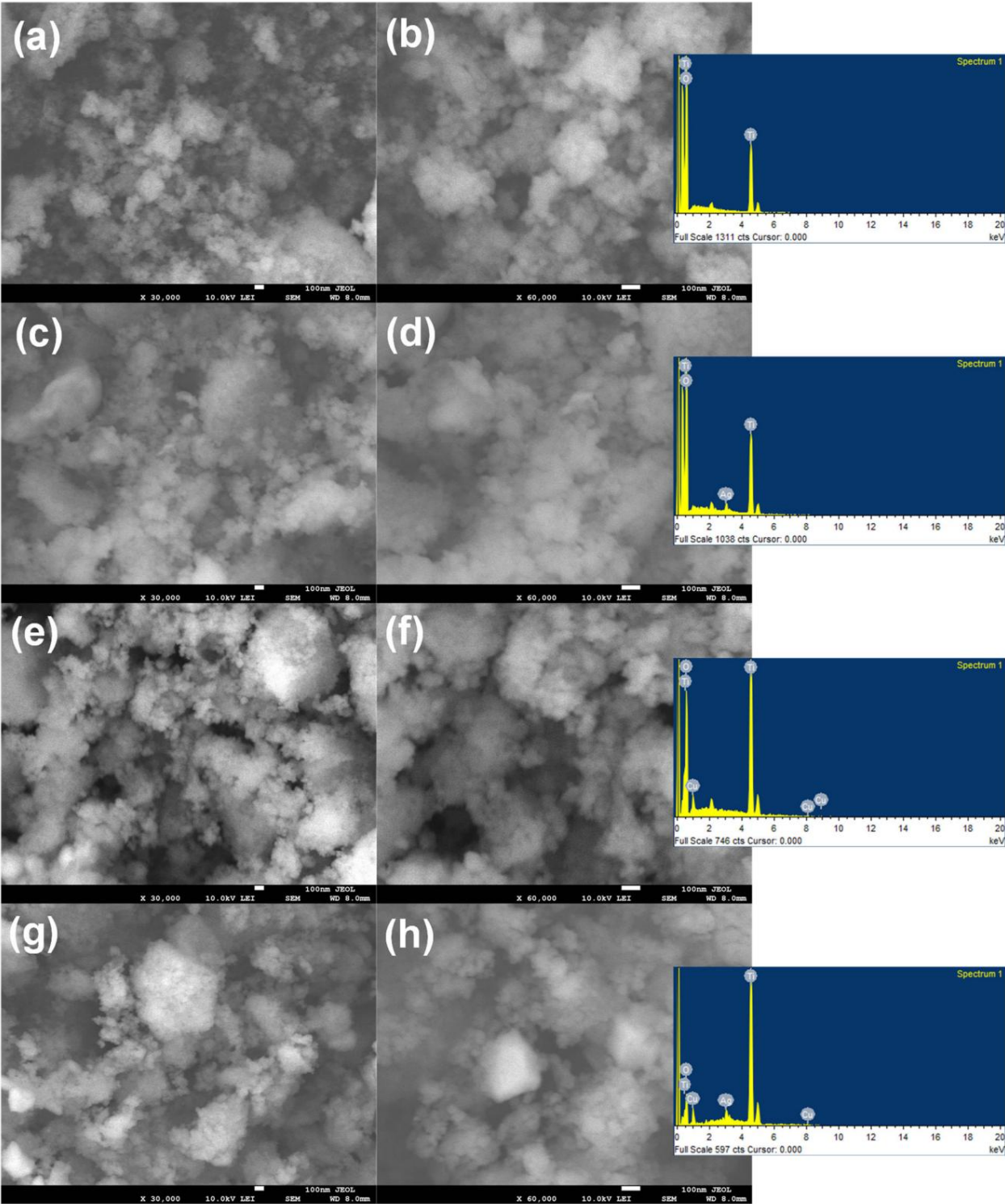


Рисунок 2. СЭМ-микрофотографии TiO_2 (а, б), Ag/TiO_2 (в, г), Cu/TiO_2 (д, е) и Ag@Cu/TiO_2 (ж, з). Рисунок 2. СЭМ-микрофотографии TiO_2 (а,б), Ag/TiO_2 (в,д), Cu/TiO_2 (е,и) и Ag@Cu/TiO_2 (г,и), а также их соответствующий элементный анализ, вместе с соответствующим им элементным анализом.

Анализ химического состояния $\text{Ti}2p$ был дополнительно изучен для выяснения химических взаимодействий в TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 (рис. 6а–д). При анализе химического состояния чистого TiO_2 (рис. 6а) наблюдались отчетливые пики при 457,99 эВ и 463,67 эВ, соответствующие $\text{Ti}2p_{3/2}$ и $\text{Ti}2p_{1/2}$, с вкладами 73,32% и 26,68% соответственно. Введение Ag и Cu в состав TiO_2 привело к изменению вкладов $\text{Ti}2p_{3/2}$ и $\text{Ti}2p_{1/2}$. В частности, образец Ag/TiO_2 продемон-

суммарные вклады 72,05% (Ti2p3/2) и 27,95% (Ti2p1/2). Аналогично, Cu/TiO2 показал общий вклад 78,38% (Ti2p3/2) и 21,62% (Ti2p1/2). Итоговый тройной композит Ag@Cu/TiO2 показал общий вклад 72,31% (Ti2p3/2) и 27,69% (Ti2p1/2). Таким образом, наблюдаемые изменения атомных процентных вкладов Ti2p3/2 и Ti2p1/2 в чистом TiO2 после добавления Ag и Cu указывают на успешное взаимодействие между компонентами.

7

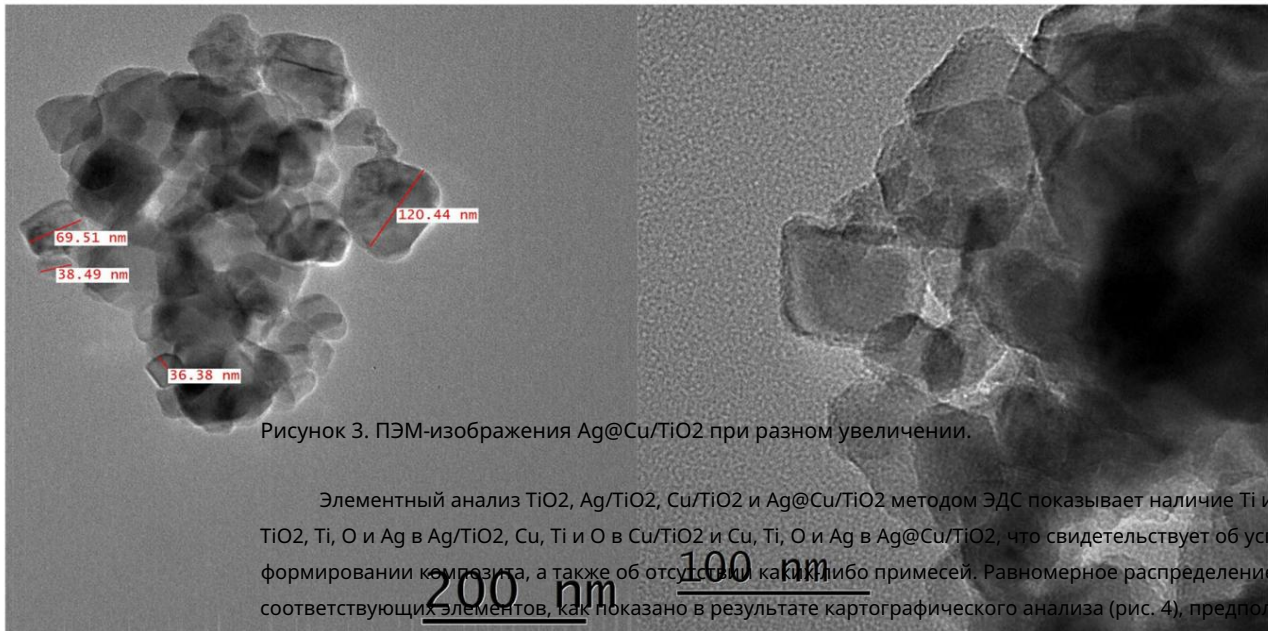


Рисунок 3. ПЭМ-изображения Ag@Cu/TiO2 при разном увеличении.

Элементный анализ TiO2, Ag/TiO2, Cu/TiO2 и Ag@Cu/TiO2 методом ЭДС показывает наличие Ti и O в TiO2, Ti, O и Ag в Ag/TiO2, Cu, Ti и O в Cu/TiO2 и Cu, Ti, O и Ag в Ag@Cu/TiO2, что свидетельствует об успешном формировании композита, а также об отсутствии каких-либо примесей. Равномерное распределение соответствующих элементов, как показано в результате картографического анализа (рис. 4), предполагает

Рисунок 3. ПЭМ-изображения Ag@Cu/TiO2 при разном увеличении.

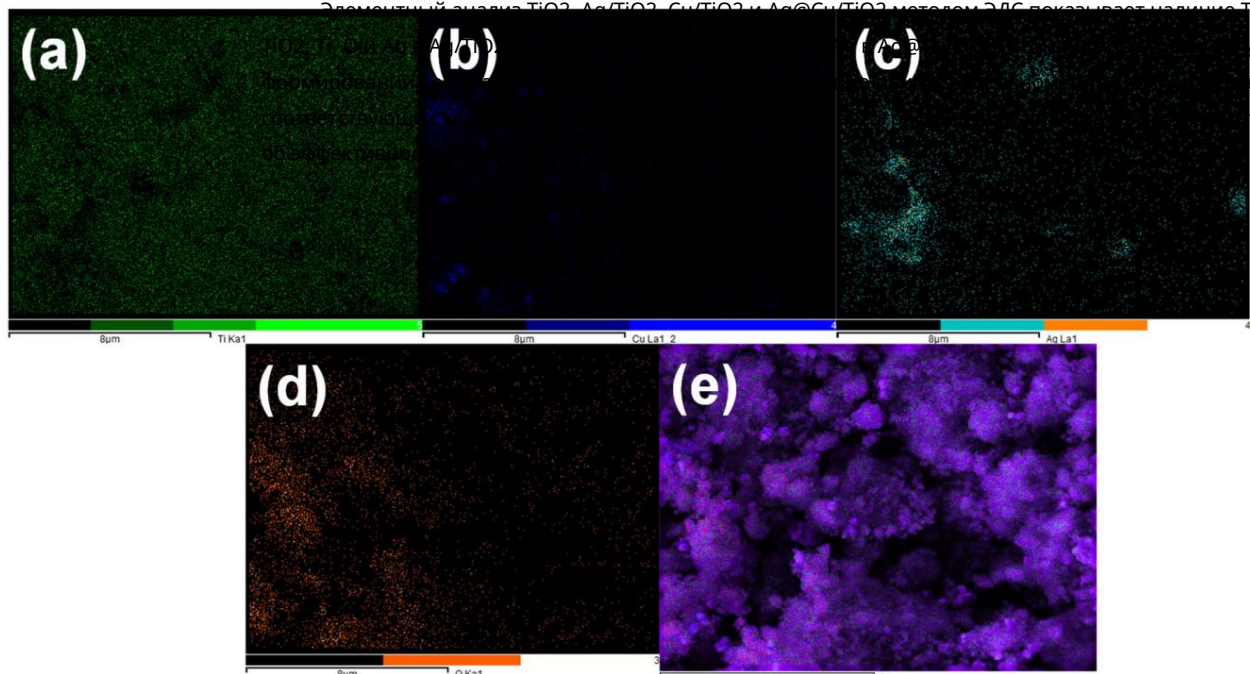
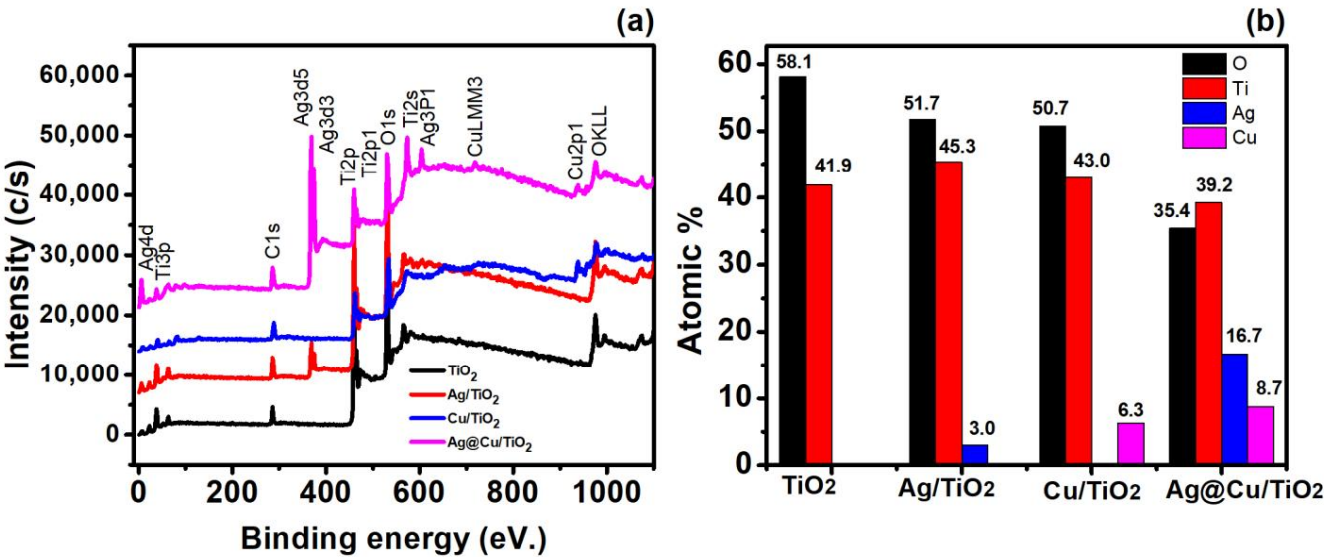


Рисунок 4. Картирование элементов распределения Ti (a), O (b), Ag (c), Cu (d) и смешанных элементов (e).

3.2. Поверхностный и химический анализ. Элементный

состав и функциональные группы полученных катализаторов (чистые TiO2, Ag/TiO2, Cu/TiO2 и Ag@Cu/TiO2) изучены методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Обзорные спектры (рис. 5а) позволили получить представление о поверхностных элементах, а обнаруженный состав проиллюстрирован на рис. 5б. Рис. 4. Элементарное картирование распределения Ti (a), O (b), Ag (c), Cu (d) и смешанных элементов (e).

3.2. Композиционный и химический анализ поверхности



Химия 2024, 6, НА ЭКСПЕРТНУЮ РЕЦЕНЗИЮ

Рис. 5. Спектры РФЭС (а) и состав TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ (б) и Рис. 5. Спектры РФЭС (а) и состав TiO₂, Ag/TiO₂, Cu (б) /TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂. Ag@Cu/TiO₂.

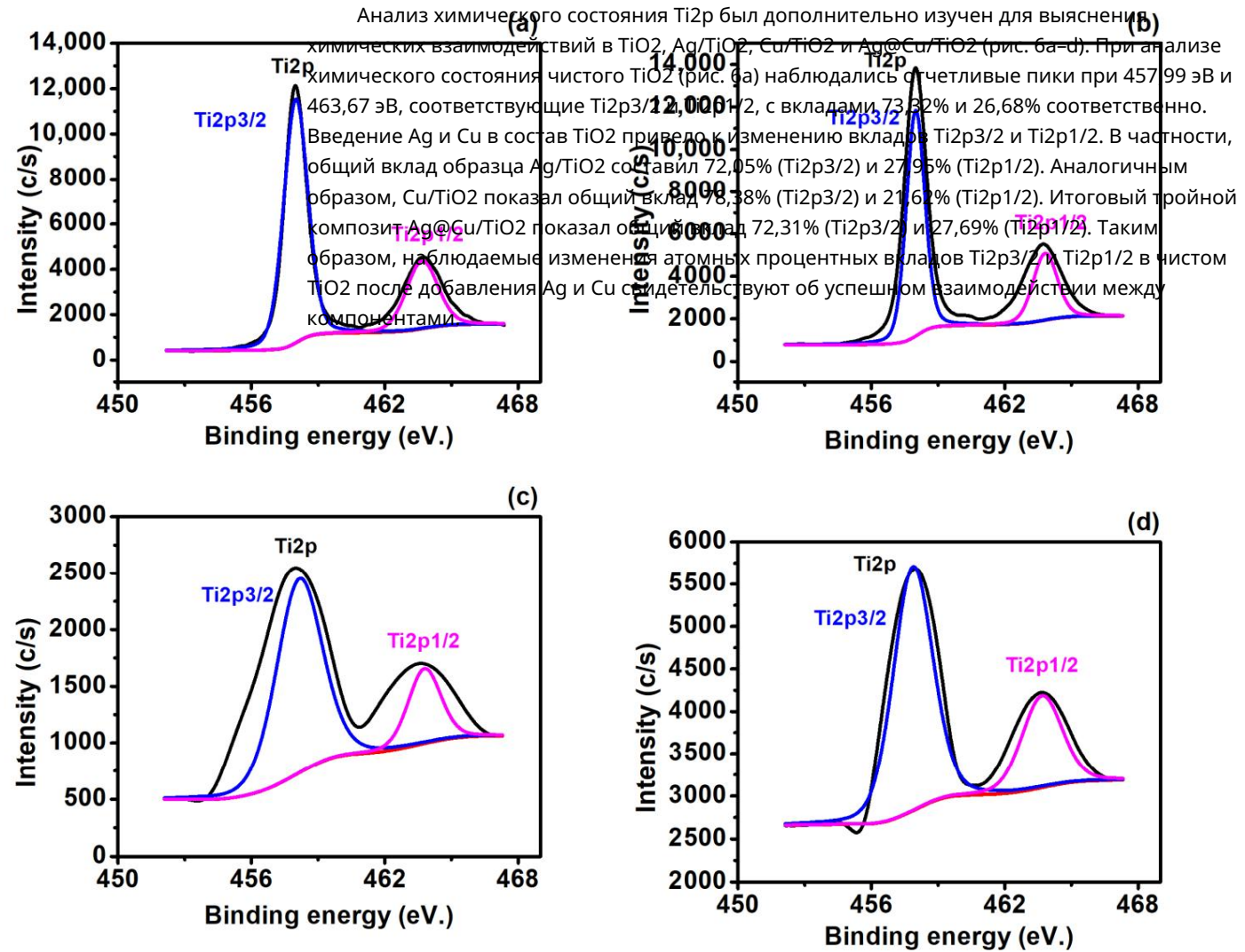


Рис. 6. (а–д) Спектры высокого разрешения Ti2p для TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂.

Спектры O1s чистого TiO₂ (рис. 7а) демонстрируют два основных пика при 530 эВ и 532,5 эВ, которые объясняются взаимодействием кислорода и Ti при 530 эВ и кислородной вакансией при 532,5 эВ соответственно [1]. Примечательно, что присутствие Ag в TiO₂ (Ag/TiO₂), как показано на рисунке 7b, приводит к увеличению кислородной вакансии с 12,54% до 13,7

Спектры O1s чистого TiO2 (рис. 7а) демонстрируют два основных пика при 530 эВ и 532,5 эВ, которые объясняются взаимодействием кислорода и Ti при 530 эВ и кислородной вакансией при 532,5 эВ соответственно [1]. Примечательно, что присутствие Ag в TiO2 (Ag/TiO2), как показано на рисунке 7б, приводит к увеличению кислородной вакансии с 12,54% до 13,12%. Эта тенденция продолжается с добавлением Cu к TiO2 (Cu/TiO2) и тройного соединения Ag@Cu/TiO2. Максимум кислородной вакансии, достигающий 56,45%, наблюдается для Ag@Cu/TiO2. Эти вакансии служат активными местами захвата молекул красителей и загрязняющих веществ, тем самым усиливая фотокаталитическую активность материала [2]. Эти результаты согласуются с нашими фотокаталитическими результатами, как описано ниже на рисунке 9. Кроме того, очевиден дополнительный пик при энергии около 534,6 эВ для Ag@Cu/TiO2, приписываемый поверхности. Химия 2024, 6, ДЛЯ ЭКСПЕРТНОЙ ОБЗОРА кислорода (Os), что дополнительно способствует усилению фотокаталитической активности тройного соединения Ag@Cu/TiO2 по сравнению с чистыми TiO2, Ag/TiO2 и Cu/TiO2.

10

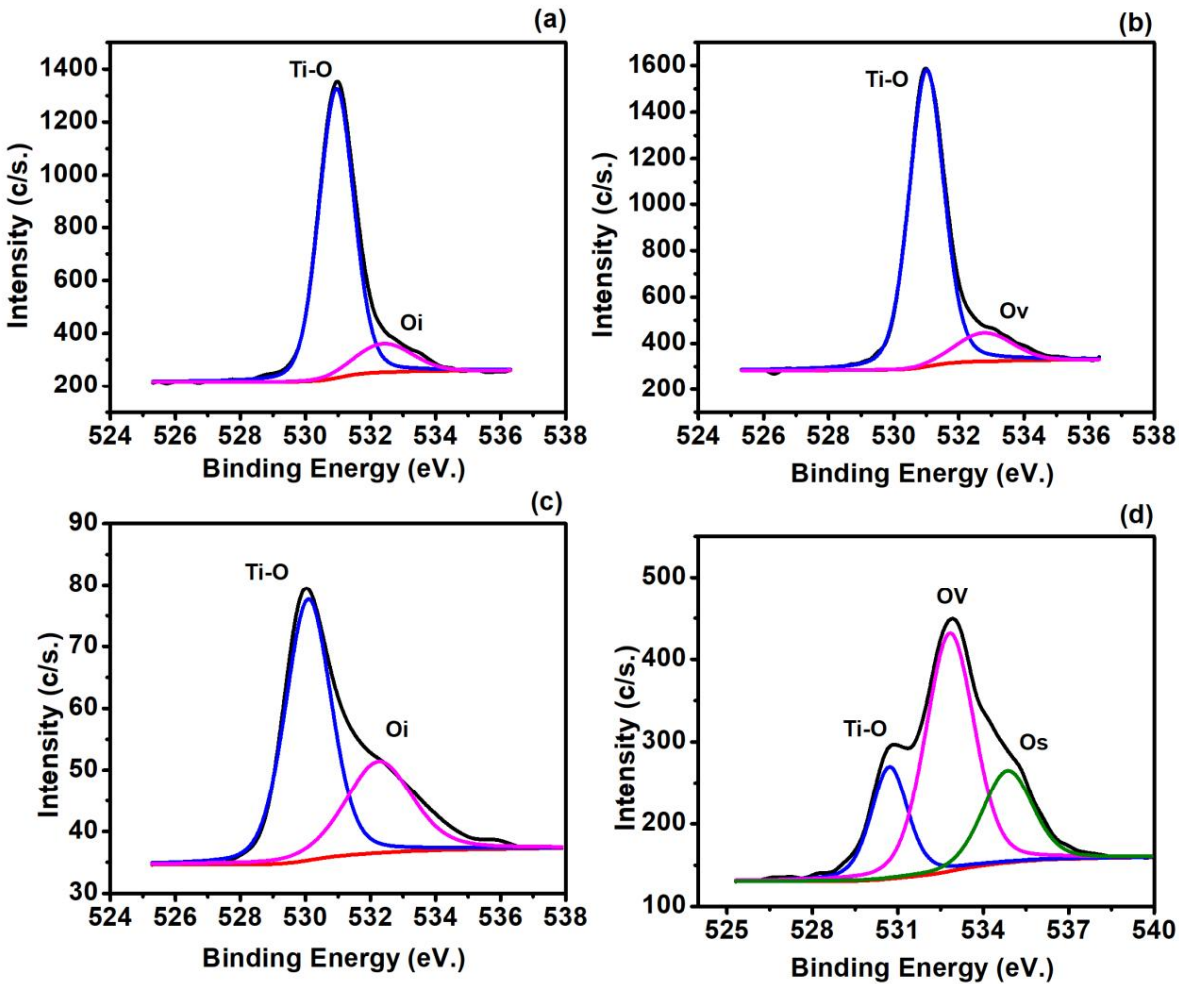


Рис. 7. (а–д) Высокое разрешение O1 для чистых TiO2, Ag/TiO2, Cu/TiO2 и Ag@Cu/TiO2.

Химическое соединение Ag@Cu/TiO2 (рис. 8а) демонстрирует пик Ag3d3/2 при 368 эВ и 374 эВ соответственно вкладами 59,99% и 40,10% и Ag3d3/2 при 368 эВ и 374 эВ соответственно вкладами 59,99% и 40,10%. Однако при добавлении Cu к Ag@Cu/TiO2, как показано на рисунке 8б, эти пики претерпевают небольшие изменения, при этом процентные значения смещаются до 59,03% и 40,97%, эти пики претерпевают небольшие изменения, при этом процентные значения смещаются до 59,03% и 40,97% соответственно. Анализ Cu2p3 Cu/TiO2 и Ag@Cu/TiO2 представлен на рисунках 9с,д. Пики, наблюдаемые при 937 эВ, объясняются взаимодействием Cu с кислородом (CuOx), а пики при 945,5 эВ соответствуют пику сателлита встрайки, пике с вкладами 27,46% и 30,71% соответственно [1]. При этом изменение вклада сателлита встрайки дополнительно подтверждает изменение вклада фотокаталитической активности сателлитного пика встрайки, что дополнительно фотокаталитической активности тройного Ag@Cu/TiO2. тройной Ag@Cu/TiO2.

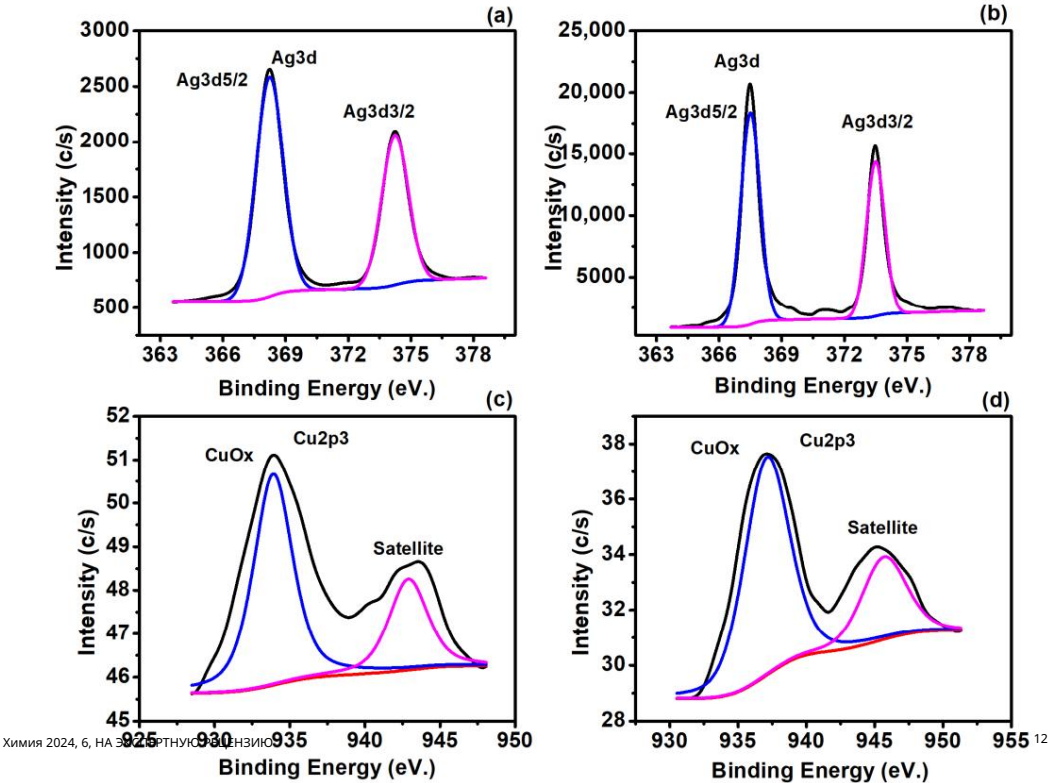


Рис. 8. (a,b) Ag3d-спектры Ag/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂; (c,d) Cu2p-спектры Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂. Рис. 9. Анализ запрещенной зоны TiO₂ (a), Ag/TiO₂ (b), Cu/TiO₂ (c) и Ag@Cu/TiO₂ (d). Вставка показывает изменение ширины запрещенной зоны.

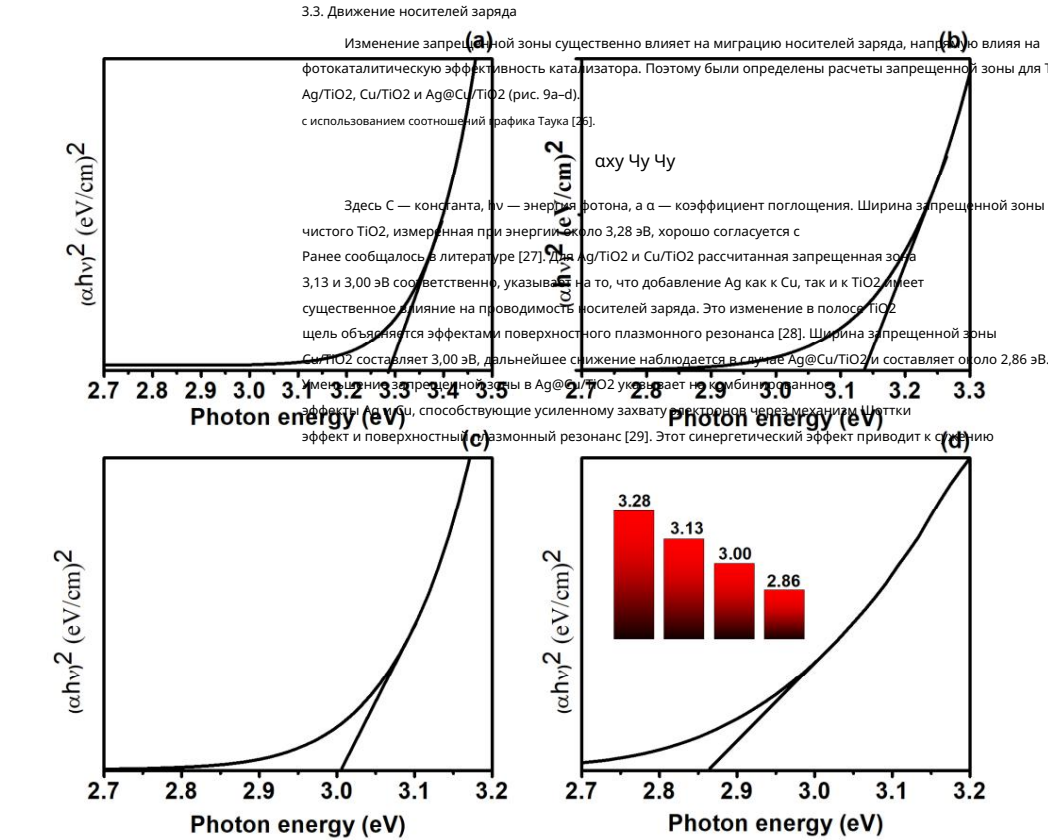


Рисунок 9. Анализ запрещенной зоны TiO₂ (a), Ag/TiO₂ (b), Cu/TiO₂ (c) и Ag@Cu/TiO₂ (d). Вставка показывает изменение ширины запрещенной зоны.

3.4. Коэффициент рекомбинации заряда

Коэффициент рекомбинации зарядов обратно пропорционален фотокаталитической эффективности. Коэффициенты рекомбинации зарядов TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂ определяли по спектрам фотолюминесценции, как показано на рисунке 10. Анализ спектров фотолюминесценции показал, что TiO₂ демонстрирует пик высокой интенсивности по сравнению с Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂, что указывает на высокий коэффициент рекомбинации TiO₂, что, как следствие, приводит к снижению фотокаталитической эффективности.

3.3. Движение носителей заряда

Изменение запрещенной зоны существенно влияет на миграцию носителей заряда, напрямую влияя на фотокаталитическую эффективность катализатора. Поэтому расчеты запрещенной зоны для TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 (рис. 9a–d) были определены с использованием соотношений графика Тауца [26].

$$\alpha(h\nu) = C(h\nu - E_g)^n$$

Здесь C — константа, $h\nu$ — энергия фотона, а α — коэффициент поглощения. Ширина запрещенной зоны чистого TiO_2 , измеренная при энергии около 3,28 эВ, хорошо согласуется с ранее опубликованными данными [27]. Для Ag/TiO_2 и Cu/TiO_2 рассчитанная ширина запрещенной зоны 3,13 и 3,00 эВ соответственно указывает на то, что добавление Ag как к Cu, так и к TiO_2 оказывает существенное влияние на проводимость носителей заряда. Такое изменение ширины запрещенной зоны TiO_2 объясняется эффектами поверхностного плазмонного резонанса [28]. Ширина запрещенной зоны Cu/TiO_2 составляет 3,00 эВ, дальнейшее уменьшение наблюдается в случае Ag@Cu/TiO_2 и составляет около 2,86 эВ. Уменьшение запрещенной зоны в Ag@Cu/TiO_2 указывает на совместное влияние Ag и Cu, способствующее усилению захвата электронов за счет эффекта Шоттки и поверхностного плазмонного резонанса [29]. Этот синергетический эффект приводит к сужению запрещенной зоны, ускорению движения электронов и дырок в Ag@Cu/TiO_2 , что, как следствие, приводит к усилению фотокаталитической

3.4. Коэффициент рекомбинации заряда

Коэффициент рекомбинации зарядов обратно пропорционален фотокаталитической эффективности. Коэффициенты рекомбинации зарядов TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 были определены с помощью спектров фотolumинесценции, как показано на рисунке 10. Анализ спектров фотolumинесценции показал, что TiO_2 демонстрирует пик высокой интенсивности. по сравнению с Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 , что указывает на высокий коэффициент рекомбинации для TiO_2 , что, как следствие, приводит к снижению фотокаталитической эффективности. И наоборот, Ag@Cu/TiO_2 имел низкую интенсивность, что предполагает более высокую эффективность разложения. Результаты фотolumинесценции согласуются с нашими фотокаталитическими данными, которые показали, что эффективность разложения следующая: $\text{Ag@Cu/TiO}_2 > \text{Cu/TiO}_2 > \text{Ag/TiO}_2 > \text{TiO}_2$.

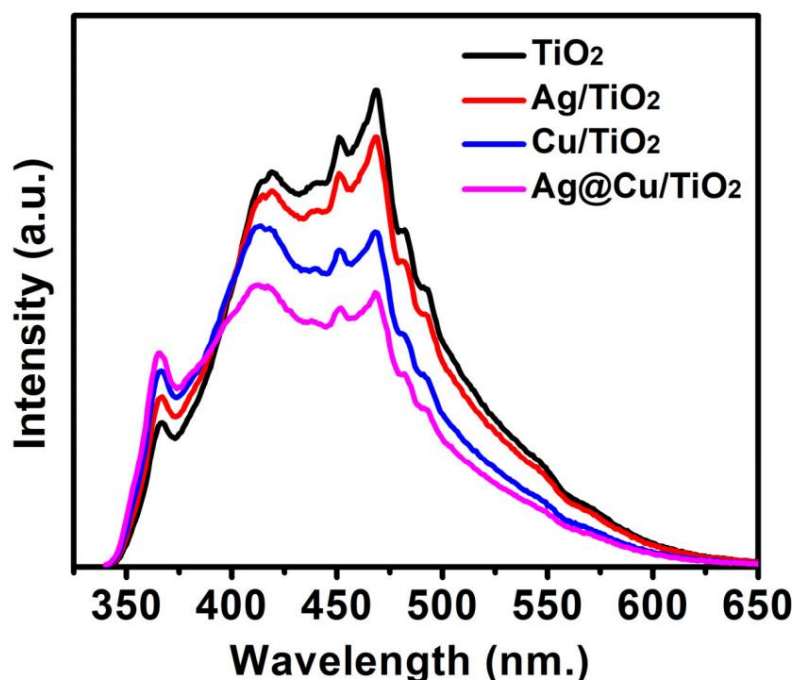


Рисунок 10. Коэффициент рекомбинации заряда TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 .

3.5. Фотокаталитическая деградация

РБ. Зависящий от времени УФ-Вид спектр РБ при УФ-Вид-облучении изображен на рисунке 9а, где характерный пик поглощения находится при λ_{max} 545 нм, что является основной особенностью РБ. Наблюдая за рис. 9а, становится видно, что с увеличением времени облучения от 0 до 60 мин пик поглощения постепенно уменьшается, что указывает на деградацию РБ в TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 под видимым светом.

3.5. Фотокаталитическая деградация

РБ. Зависящий от времени УФ-Вид спектр РБ при УФ-Вид-облучении изображен на рисунке 9а, где характерный пик поглощения находится при λ_{max} 545 нм, что является основной особенностью РБ. Наблюдая за рис. 9а, становится видно, что с увеличением времени облучения от 0 до 60 мин пик поглощения постепенно уменьшается, что указывает на деградацию РБ под действием TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 под видимым светом.

Рисунок 9b,c иллюстрирует статистику деградации, демонстрируя, что эффективность деградации чистого TiO_2 составляет примерно 24,41% в пределах 60 мин облучения. Такая относительно низкая эффективность обусловлена большой запрещенной зоной и высокой скоростью рекомбинации заряда. С добавлением Ag эффективность разложения чистого TiO_2 увеличилась примерно до 34,73% за тот же период. Это усиление обусловлено резонансом поверхностной фотолюминесценции, индуцированным серебром, которое подавляет рекомбинацию носителей заряда и, как следствие, усиливает деградацию РБ под действием Ag/TiO_2 [25].

Эффективность разложения Cu/TiO_2 составила примерно 68,38%, что в 2,82 раза выше, чем у чистого TiO_2 . Это улучшение связано с уменьшением коэффициента рекомбинации зарядов и введением активных центров, таких как кислородные вакансии, в чистый TiO_2 , что приводит к более эффективному захвату молекул РБ и, таким образом, повышает эффективность разложения Cu/TiO_2 [26]. Аналогично, комбинированный эффект серебра и меди проявляется в фотокаталитической эффективности тройного соединения Ag@Cu/TiO_2 , скорость разложения которого составила примерно 81,07%, что в 3,31 раза выше, чем у TiO_2 . Заметное улучшение связано с эффективным уменьшением рекомбинации электронно-дырочных пар и введением большего количества активных центров для захвата молекул РБ. Кроме того, введение серебра и меди в TiO_2 привело к повышенному поглощению света, что еще больше способствовало общему улучшению. Более того, по мере увеличения эффективности разложения константа скорости реакции TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 и Ag@Cu/TiO_2 также увеличилась. Константа скорости реакции (рис. 11d) для Ag@Cu/TiO_2 составила примерно $2,76 \times 10^{-2}$.

в 5,94 раза больше, чем у TiO_2 . Константа скорости реакции для Ag/TiO_2 и Cu/TiO_2 составляла около $7,11 \times 10^{-3}$ и $1,91 \times 10^{-2}$ соответственно.

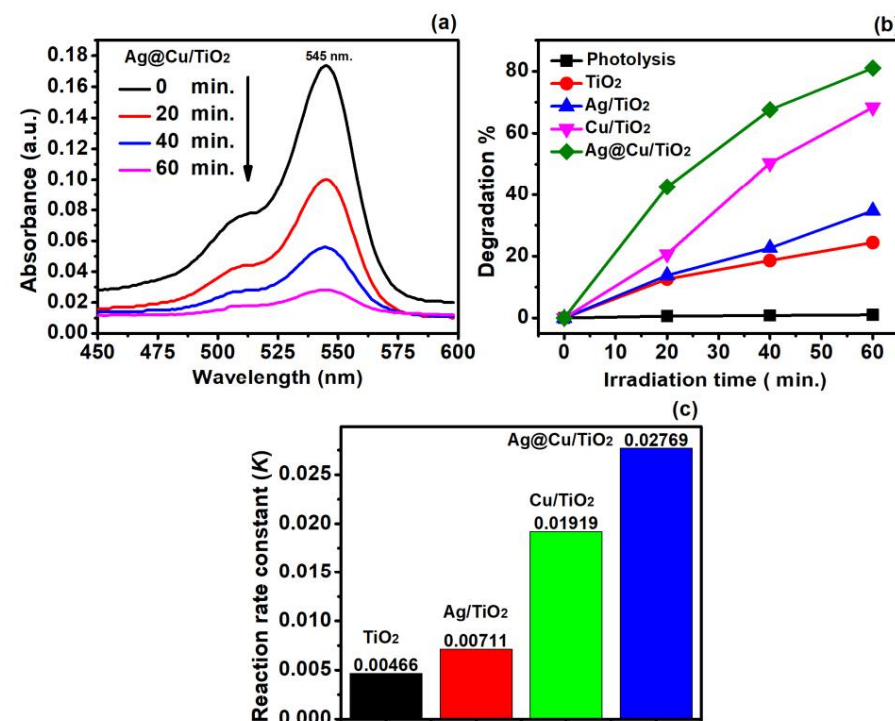


Рис. 11. (а) Временной УФ-Вид спектр РБ для Ag@Cu/TiO_2 , (б) статистика деградации и (в) константа скорости реакции РБ.

Рис. 11. (а) Временной УФ-Вид спектр РБ для Ag@Cu/TiO_2 , (б) деградация и Ag@Cu/TiO_2 при облучении РБ, (в) статистика деградации и Ag@Cu/TiO_2 при облучении РБ. Оптимизированное значение 200 мг каждого катализатора в растворе объемом 250 мл, содержащем 30 мг/л красителя РБ.

3.5.1. Влияние концентрации РБ

Концентрация красителя является решающим фактором, поскольку она может как повышать, так и снижать фотокаталитическую эффективность катализатора. Чтобы проверить это, была проведена серия реакций при различных концентрациях РБ, а именно 5, 20, 30, 40 и 50 частей на миллион, сохраняя при этом дозировку Ag@Cu/TiO_2 фиксированной на уровне 200 мг/250 мл и интенсивность света галогенной лампы мощностью 500 Вт. Как показано на рисунке 12а, было обнаружено, что разложение РБ достигает своего пика, около 81,07%, при концентрации РБ 30 частей на миллион. Результаты показали прогрессивное увеличение

3.5.1. Влияние концентрации РВ

Концентрация красителя является решающим фактором, поскольку она может как повышать, так и снижать фотокаталитическую эффективность катализатора. Чтобы проверить это, была проведена серия реакций при различных концентрациях РВ, а именно 5, 20, 30, 40 и 50 частей на миллион, сохраняя при этом дозу Ag@Cu/TiO_2 фиксированной на уровне 200 мг/250 мл и световой режим. интенсивность при галогенной лампе мощностью 500 Вт. Как показано на рисунке 12а, было обнаружено, что разложение РВ достигает своего пика, около 81,07%, при концентрации РВ 30 частей на миллион. Результаты показали постепенное увеличение скорости разложения с 5 частей на миллион до 30 частей на миллион, при этом значения разложения составили примерно 49,5%, 57,1%, 70,9% и 81,07% для 5 частей на миллион, 10 частей на миллион, 20 частей на миллион и 30 частей на миллион соответственно. Примечательно, что деградация РВ начала снижаться после 30 ppm, при этом значения деградации составили 75,9% и 65,2% для 40 ppm и 50 ppm соответственно. Высокоэффективная фотокаталитическая эффективность Ag@Cu/TiO_2 обусловлена растущей доступностью молекул красителя РВ для возбуждения и переноса энергии с увеличением концентрации РВ [30]. Однако при превышении критического уровня концентрации, в нашем случае 30 ppm, молекулы красителя начинают поглощать излучение вместо поглощения Ag@Cu/TiO_2 , что приводит к снижению фотокаталитической эффективности Ag@Cu/TiO_2 . TiO_2 [31].

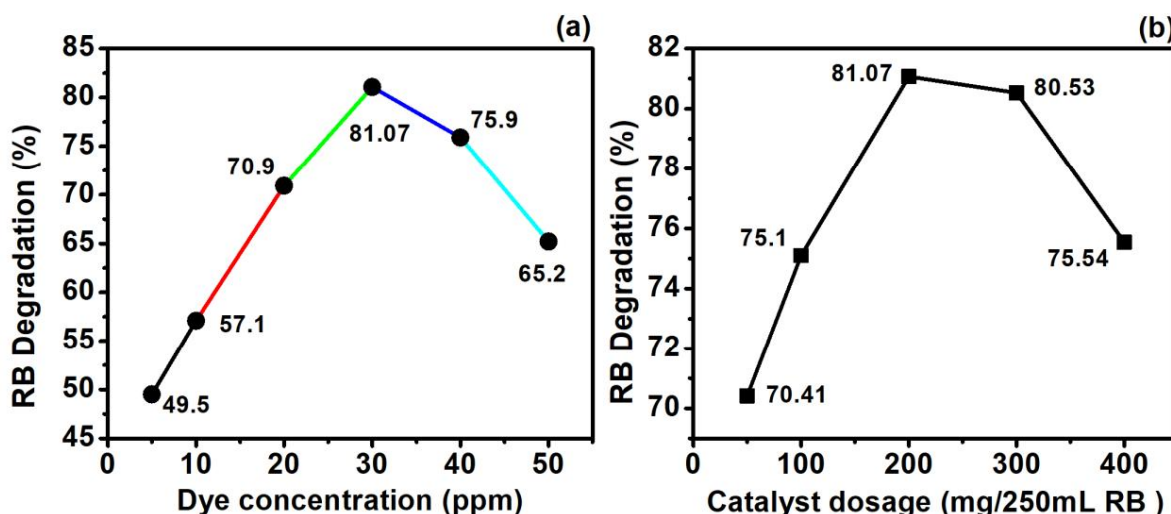


Рисунок 12. (а) Влияние концентрации РВ при 5 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm и 50 ppm, а также на уровень дозирования Ag@Cu/TiO_2 на уровне 200 мг/250 мл на уровне интенсивности света при 500 Вт. (б) Изменение дозировки Ag@Cu/TiO_2 : 100 мг/250 мл, 200 мг/250 мл, 300 мг/250 мл и 400 мг/250 мл. 200 мг/250 мл, 300 мг/250 мл и 400 мг/250 мл.

3.5.2. Влияние дозировки Ag@Cu/TiO_2

Фотокаталитическая деградация зависит от количества катализатора, используемого. Для этого было проведено исследование влияния Ag@Cu/TiO_2 на разложение РВ при фиксированной дозе красителя 300 ppm и интенсивности света 500 Вт. Результаты (рис. 12б) показали, что эффективность Ag@Cu/TiO_2 в отношении деградации РВ увеличивается с увеличением дозы катализатора. В частности, эффективность разложения РВ достигла максимума при дозе 200 мг/250 мл (81,07%). При дальнейшем увеличении дозы катализатора до 400 мг/250 мл эффективность разложения РВ снизилась до 75,54%. Такое снижение эффективности можно объяснить тем, что при слишком высокой дозе катализатора молекулы красителя РВ начинают поглощать излучение вместо поглощения Ag@Cu/TiO_2 , что приводит к снижению фотокаталитической эффективности Ag@Cu/TiO_2 . [31].

Результаты (рис. 12б) показали, что эффективность Ag@Cu/TiO_2 в отношении деградации РВ увеличивается с увеличением дозы катализатора. В частности, эффективность разложения РВ достигла максимума при дозе 200 мг/250 мл (81,07%). При дальнейшем увеличении дозы катализатора до 400 мг/250 мл эффективность разложения РВ снизилась до 75,54%. Такое снижение эффективности можно объяснить тем, что при слишком высокой дозе катализатора молекулы красителя РВ начинают поглощать излучение вместо поглощения Ag@Cu/TiO_2 , что приводит к снижению фотокаталитической эффективности Ag@Cu/TiO_2 . [31].

Чтобы проверить это, была проведена серия реакций при различных концентрациях РВ, а именно 5, 20, 30, 40 и 50 частей на миллион, сохраняя при этом дозу Ag@Cu/TiO_2 фиксированной на уровне 200 мг/250 мл и световой режим. интенсивность при галогенной лампе мощностью 500 Вт. Как показано на рисунке 12а, было обнаружено, что разложение РВ достигает своего пика, около 81,07%, при концентрации РВ 30 частей на миллион. Результаты показали постепенное увеличение скорости разложения с 5 частей на миллион до 30 частей на миллион, при этом значения разложения составили примерно 49,5%, 57,1%, 70,9% и 81,07% для 5 частей на миллион, 10 частей на миллион, 20 частей на миллион и 30 частей на миллион соответственно. Примечательно, что деградация РВ начала снижаться после 30 ppm, при этом значения деградации составили 75,9% и 65,2% для 40 ppm и 50 ppm соответственно. Высокоэффективная фотокаталитическая эффективность Ag@Cu/TiO_2 обусловлена растущей доступностью молекул красителя РВ для возбуждения и переноса энергии с увеличением концентрации РВ [30]. Однако при превышении критического уровня концентрации, в нашем случае 30 ppm, молекулы красителя начинают поглощать излучение вместо поглощения Ag@Cu/TiO_2 , что приводит к снижению фотокаталитической эффективности Ag@Cu/TiO_2 . TiO_2 [31].

Возможность циклического повторного использования Ag@Cu/TiO_2 оценивалась в течение семи последовательных циклов (см. Рисунок S2). Примечательно, что возможность повторного использования оставалась стабильной на уровне 79,96% даже после седьмого цикла. Эти результаты подчеркивают многообещающий потенциал Ag@Cu/TiO_2 для красителя РВ.

Возможность циклического повторного использования Ag@Cu/TiO₂ оценивалась в течение семи последовательных циклов (см. Рисунок S2). Примечательно, что возможность повторного использования оставалась стабильной на уровне 79,96% даже после седьмого цикла. Эти результаты подчеркивают многообещающий потенциал Ag@Cu/TiO₂ для деградации красителя RB под действием видимого света.

На рисунке 13 изображен предполагаемый путь разложения Ag@Cu/TiO_2 RB. Возможны три пути образования бинарных и тройных гетеропереходов с TiO_2 .

Химия 2024. 6. НА ЭКСПЕРТНУЮ РЕЦЕНЗИЮ

Большое количество дырок в Si реагирует с RB, вызывая окисление и последующую деградацию RB. Кроме того, генерируемый СВ происходит в бинарном гетеропереходе Ag@TiO₂ из-за различий в TiO₂ , и электроны индуцируют RB, деградируя в значительных количествах. Поверхностные электроны в Si образуют дырки в TiO₂ в бинарном гетеропереходе Ag@TiO₂ из-за различий в работе выхода. Перемещение электронов из TiO₂ в Si приводит к образованию значительных дырок в фотокатализаторской деградации электронов под действием видимого света [33]. Шоттки, это в свою очередь, мик-резонанс (SPR) увеличивает фотокаталитическую активность [33]. Кроме того, поверхность Ag подвергается сбору фотонов. Миграция дырок в Si способствует возникновению плазмонного резонанса (SPR) и увеличивает фотокаталитическую активность, стимулируя тройные электронные гетеропереходы в Ag@Si/TiO₂, где электроны передаются в СВ миграции [33]. Здесь они ускоряют процессы окисления тройных гетеропереходов в Ag@Si/TiO₂, где электроны переходят в СВ и восстанавливаются, образуя свободные радикалы. Процесс разложения начинается, когда RB поглощает TiO₂ и, в конечном итоге, переходит в СВ Ag. Здесь ускоряются процессы окисления эти радикалов, и сокращение, производя свободные радикалы. Процесс деградации начинается, когда RB поглощает эти радикалы.

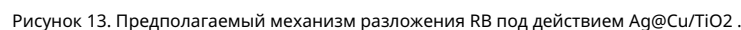


Рисунок 13. Предполагаемый механизм разложения РБ под действием Ag@Cu/TiO₂.

3.6. Производство водорода.

Используя 20%-ную концентрацию метанола в качестве поглотителя, мы оценили фотокаталитическое образование водорода TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag@Cu/TiO₂. Результаты, как

Chemistry 2024, 6, FOR PEER REVIEW 17

моль ч-1 г значительно увеличилась до 10,1 моль ч-1 г при добавлении Ag). Это улучшение может быть связано с ролью Ag в улучшении разделения носителей заряда [34]. Более того, было замечено, что Cu/TiO₂ обладает более высокой способностью к производству водорода по сравнению с Ag/TiO₂, с приблизительным значением 14,4 моль ч⁻¹ г. Производство водорода, ч. Было обнаружено, что концентрация Ag@Cu/TiO₂ составляет около 17,1 моль ч-1 г-1, что позволяет предположить, что содержание Ag и Cu в составе Ag@Cu/TiO₂ предполагает, что Ag и Cu TiO₂ составляет около 17,1 моль ч-1 г, что вносит существенный вклад в увеличение производства водорода в чистом TiO₂ [35] дополнительно способствует увеличению производства водорода в чистом TiO₂ [35]. Кроме того, РФЭС-анализ O1 также указывает на заметное увеличение кислородных вакансий. РФЭС-анализ O1 указывает на заметное увеличение кислородных вакансий для Ag@Cu/TiO₂ по сравнению с чистыми TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag/TiO₂. Это наблюдение для Ag@Cu/TiO₂ по сравнению с чистыми TiO₂, Cu/TiO₂ и Ag/TiO₂. Это наблюдение служит еще одним фактором, способствующим увеличению производства водорода. служит еще одним фактором, способствующим увеличению производства водорода.

Вклад авторов: концептуализация, SY, AJ, PK, SAA и MOA; Курирование данных, SS и SY; Формальный анализ, SY, SS и SAA; Приобретение финансирования, SY и PK; Расследование SY, AJ, PK, SAA, MOA и MA; Методология, SY, PK, AJ и MOA; Администрация проекта, SY, AJ, PK и MOA; Ресурсы, SY, AJ, PK и MOA; Программное обеспечение, СС и МА; Надзор, AJ, PK и MOA; Валидация, SY и MA; Визуализация, СИ, PK, САА и MOA; Письмо — первоначальный вариант, SY и MA; Написание — обзор и редактирование, SY, AJ, PK и MOA Все

Рекомендации

Рекомендации

Цзян, К.; Таң, В. Универсальные применения электрохимических проточных систем в очистке воды. Процессы. хим. англ. 2023, 473, 1–45400. [CrossRef]

Хуанг, Л.; Хуанг, Х.; Ян, Дж.; Лю, Ю.; Цзян, Х.; Чжан, Х.; Тан, Дж.; Лю, К. Прогресс исследований в области применения перовскита Адсорбция и фотокаталитическое удаление загрязняющих веществ из водной среды с использованием перовскита интересов. Адсорбция и фотокаталитическое удаление загрязнителей воды. Дж. Хазард. Матер. 2023, 442, 130024.

Нур Р.; Максуд, А.; Байг, А.; Панде, СВ; Захра, С.М.; Саад, А.; Анвар, М.; Сингх, СК. Комплексный обзор водных ресурсов Загрязнение, регион Южной Азии; Пакистан. Городской климат. 2023, 48, 101413. [CrossRef]

Хуан, С.-Т.; Ли, WW; Чанг, Ж.-Л.; Хуанг, Вашингтон; Чжоу, С.-Ю.; Чен, К.-К. Гидротермальный синтез нанокубов SrTiO₃: характеристика, фотокаталитическая активность и путь разложения. Дж. Тайваньского института. хим. англ. 2014, 45, 1927–1936. [Перекрестная ссылка]

Сoleyman, X.M.; Хоссен, Массакусеттс; Абд Азиз, А.; Яхья, Нью-Йорк; Достопочтенный, ЛК; Чинг, СЛ; Монир, Мьюзик; Зох, К.-Д. Производительность Оценка технологий очистки сточных вод красителями: обзор. Дж. Энвайрон. хим. англ. 2023, 11, 109610. [CrossRef]

Бехешти, А.; Хашиemi, Ф.; Бехванди, Ф.; Майер, П.; Ацеи, Д. Селективная Высокая адсорбционная способность красителя Конго красный в новом 3D Супрамолкулярный комплекс и его магнитный гидрид. Неорг. хим. Передний. 2018, 5, 694–704. [Перекрестная ссылка]

Амири, С.; Ватанпур, В.; Он Т. Оптимизация процесса коагуляции-флокуляции для эффективного удаления мышьяка из высококонцентрированных Загрязненные подземные воды по методологии реагирования на поверхности. Молекулы 2022, 27, 7953. [CrossRef] [PubMed]

Ган, Ю.; Дин, К.; Сюй, С.; Ло, С.; Цюй, С.; Бу, Ю.; Хуанг, С.; Сонг, Х. Контроль загрязнения сульфидом (S₂) путём деградации 3D Бабулман, X.M.; Хоссен, Массакусеттс; Абд Азиз, А.; Яхья, Нью-Йорк; Достопочтенный, ЛК; Чинг, СЛ; Монир, Мьюзик; Зох, К.-Д. Производительность мембранная фильтрация в очистке сточных вод/сточных вод: комплексный обзор. Дж. Хазард. Матер. 2023, 442, 130072. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Бехешти, А.; Хашиemi, Ф.; Бехванди, Ф.; Майер, П.; Ацеи, Д. Селективная Высокая адсорбционная способность красителя Конго красный в новом 3D Супрамолкулярный комплекс и его магнитный гидрид. Неорг. хим. Передний. 2018, 5, 694–704. [Перекрестная ссылка]

Саид, У.; Джилиани, А.; Икбал, Дж.; Аль-Турайф, Х. Стержни из графита из нитрида углерода в восстановленном оксидом графена @ ZnO для улучшенных Физическая и фотокаталитическая деградация. Неорг. хим. Коммун. 2022, 142, 109623. [CrossRef]

Бласкес-Моралеха, А.; Мойя, П.; Марин, М.; Боска, Ф. Синтез новых гетерогенных фотокатализаторов на основе бенгалского розы позитивные результаты исследования об эффективности использования катализатора ZnO для очистки сточных вод. Дж. Хазард. Матер. 2023, 442, 130072. [CrossRef]

Флорес, Дж.; Мойя, П.; Боска, Ф.; Марин, М. Л. Фотореактивность гетерогенных фотокатализаторов New Rose Bengal-SiO₂ с безмагнетитового сердечника для дезинфекции и деградации лекарственных средств. Катализ. Сегодня 2023, 413, 113948. [CrossRef]

Шиваджи, К.; Шридархан, К.; Кирубакран, Д.Д.; Велусами, Дж.; Эмладин, СС; Кришнамурти, С.; Девадас, А.; Нагараджан, С.; Дас, С.; Питчаймуту, С. Ультратонкие, высокоэффективные фотокатализаторы на основе оксида графена @ ZnO для очистки сточных вод. Дж. Хазард. Матер. 2023, 442, 130072. [CrossRef]

Бласкес-Моралеха, А.; Мойя, П.; Марин, М.; Боска, Ф. Синтез новых гетерогенных фотокатализаторов на основе бенгалского розы позитивные результаты исследования об эффективности использования катализатора ZnO для очистки сточных вод. Дж. Хазард. Матер. 2023, 442, 130072. [CrossRef]

Лей, Б.; Робертсон, Н. М. Биодисперсия, поверхность фторирование и применение в фотокаталитической очистке воды. Прил. Серфинг. наука 2023, 616, 156287. [CrossRef]

Арабахани, П.; Саиди, Н.; Садеги, Х.; Нурипури-Сихаст, С.; Гарагани, М.; Асарам, А. Зеленый цвет, опосредованный растительными экстрактами Синтез нанокластеров оксида цинка/углеродное нановолокно с высокоспецифичными фотокаталитическими и антимикробными свойствами для очистки сточных вод. Дж. Водный процесс, инженер. 2023, 54, 104020. [CrossRef]

Го, М.; Юань, Б.; Суй, Ю.; Сао, Ю.; Донг, Дж.; Ян, Л.; Залог, Ян, Х.; Вэй, Д.; Ван, В.; и другие. Рациональный дизайн молибдена Солнечный погложитель на основе сульфида/оксида вольфрама с усиленным фотокаталитическим разложением для очистки сточных вод от красителей. Колюидный интерфейс. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенных фотокатализаторов. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631, 33–43. [Перекрестная ссылка] [PubMed]

Христофоридис, К.К.; Форнареско, П. Фотокаталитическое производство водорода: разрыв в энергоснабжении будущего. ChemCatCh 2017, 9, 1523–1544. [Перекрестная ссылка]

Донг, С.; Фэн, Дж.; Пан, М.; Пи, Ю.; Ху, Л.; Хан, Х.; Лю, М.; Сан, Дж.; Сан, Дж. Последние разработки в области гетерогенного фотокатализа. Очистка воды с использованием фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету: обзор. PCK Adv. 2015, 3, 14610–14630. [Перекрестная ссылка]

Палаццо, Дж. С. Производство солнечной энергии с помощью фотокаталитического разложения органических соединений под воздействием света. Наука интерфейса. 2023, 631,

18. Паланисами, В.К.; Манохаран, К.; Раман, К.; Сундарам, Р. Эффективное фотокаталитическое поведение наностержней сульфида цинка под действием солнечного света в отношении разложения бенгальской розы. Дж. Матер. наук. Матер. Электрон. 2020, 31, 14795–14809. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
19. Тайеб, АМ; Хусейн Д.С. Синтез наночастиц TiO2 и их фотокаталитическая активность в отношении метиленового синего. Являюсь. Дж. Наноматер. 2015, 3, 57–63.
20. Ли, З.; Мэн, Х.; Чжан З. Последние разработки в области фотокатализа на основе MoS2: обзор. Дж. Фотохим. Фотобиол. С Фотохим. Ред. 2018, 35, 39–55. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
21. Ли, З.; Ван, С.; Ву, Дж.; Чжоу, В. Недавний прогресс в области дефектных фотокатализаторов TiO2 для применения в энергетике и охране окружающей среды. Обновить. Поддерживать. Energy Rev. 2022, 156, 111980. [\[CrossRef\]](#)
22. Чун-Те Лин, Дж.; Сопаджари, К.; Джитджанесуван, Т.; Лу, М.-К. Применение видимого света на диоксиде титана, легированном медью, катализирующем деградацию хлорфенолов. Сентябрь Пуриф. Технол. 2018, 191, 233–243.
23. Чжан Х.; Ван, Г.; Чен, Д.; Льв, Х.; Ли, Дж. Настройка фотоэлектрохимических характеристик нанокompозитов Ag-TiO2 с помощью Восстановление/окисление Ag. хим. Матер. 2008, 20, 6543–6549. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
24. Вс, М.; Ван, Ю.; Фанг, Ю.; Солнце, С.; Ю, З. Создание тройных композитов MoS2/CdS/TiO2 с усиленным фотокаталитическим действием. Активность и стабильность. J. Сплавы. Сборник. 2016, 684, 335–341. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
25. Дастгер, М.Р.; Асма, СТ; Джилани, А.; Раза, К.; Хусейн, СЗ; Шакур, МБ; Икбал, Дж.; Абдель-Вахаб, MS; Дарвеш, Р. Синтез и характеристика новых однофазных напыленных тонких пленок Cu2O : структурная, антибактериальная активность и фотокаталитическая деградация метиленового синего. Неорг. хим. Коммун. 2021, 128, 108606. [\[CrossRef\]](#)
26. Джилани А.; Икбал, Дж.; Рафик, С.; Абдель-Вахаб, MS; Джамиль, Ю.; Аль-Гамди, А.А. Морфологические, оптические и рентгеновские фотоэлектронно -химические исследования сдвига состояния тонких пленок ZnO. Оптик 2016, 127, 6358–6365. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
27. Кумари А.; Заман, М.; Кумар, А.; Сингх, VR; Гош, А.; Саху, СК; Рахаман, А.; Мандал, Словакия; Бхунья, С. Альтернативный подход к изучению фотокаталитического поведения TiO2 с использованием передовых спектроскопических методов на основе синхротрона. Дж. Матер. англ. Выполните 2023, 32, 10391–10401. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
28. Ши, Ю.; Ли, Л.; Сюй, З.; Го, Ф.; Ли, Ю.; Ши, В. Синергетическая связь пьезоэлектрических и плазмонных эффектов регулирует барьер Шоттки в гетероструктуре наночастиц Ag/ультратонких нанолентов g-C3N4 для усиления фотокаталитической активности. Прил. Серфинг. наук. 2023, 616, 156466. [\[CrossRef\]](#)
29. Ди, С.; Го, С.; Ван, Ю.; Ван, В.; Юнг, Ю.М.; Чен, Л.; Ван, Л. Влияние поверхностного плазмонного резонанса на перенос заряда в Ag@ Композиты Cu2O-gGO. Матер. хим. Физ. 2023, 301, 127621. [\[CrossRef\]](#)
30. Ханафи, МФ; Сапаве, Н. Влияние начальной концентрации на фотокаталитическое разложение красителя ремазола бриллиантового синего при использовании Никелевый катализатор. Матер. Сегодня Проц. 2020, 31, 318–320. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
31. Реза, К.М.; Курный, А.; Гульшан, Ф. Параметры, влияющие на фотокаталитическое разложение красителей с использованием TiO2 : обзор. Прил. Наука о воде. 2017, 7, 1569–1578. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
32. Мансфельдова В.; Зламалова М.; Тарабкова, Х.; Янда, П.; Ворохта, М.; Пилиай, Л.; Каван, Л. Работа выхода монокристаллов TiO2 (анатаз, рутил и брукит): влияние окружающей среды. Дж. Физ. хим. С 2021, 125, 1902–1912. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
33. Хуанг, К.; Ли, К.; Чжэн, Ю.; Ван, Л.; Ван, В.; Мэн, Х. Последние достижения в фотокатализе на основе серебра: ингибирование фотокоррозии, повышение чувствительности к видимому свету и ускорение разделения зарядов. Сентябрь Пуриф. Технол. 2022, 283, 120194 [\[Перекрестная ссылка\]](#)
34. Ядав А.А.; Хунге, Ю.М.; Канг, С.-В. Губчатая шарообразная наноструктура оксида меди, модифицированная восстановленным оксидом графена для увеличения фотокаталитического производства водорода. Матер. Рез. Бык. 2021, 133, 111026. [\[CrossRef\]](#)
35. Ву, Д.; Лю, Х.; Чен, Дж.; Лю, В.; Хистанд, Г.; Ван, Т. Сшитые микропористые трехмерные гидрогели с восстановленным графеном в качестве фотокатализатора выделения водорода. J. Наука о коллоидном интерфейсе. 2020, 577, 441–449. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.