

ФОТОХИМИЯ
И МАГНЕТОХИМИЯ

УДК 541.124+145.15

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ВОДЫ
НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2022 г. Т. С. Джабиев^{a,*}, Л. В. Авдеева^a, Т. А. Савиных^a, З. М. Джабиева^a

^a Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

*e-mail: dzhabiev@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 24.06.2021 г.

Принята к публикации 07.07.2021 г.

Изучены реакции разложения воды на H_2 и O_2 на окисно-титановых полупроводниковых суспензиях Pt/TiO₂ и Ru/SrTiO₃ при облучении УФ-светом и на Pt, CoO/CdS – квантами видимого света. Показано, что фотокаталитическое разложение воды на поверхности широкозонных полупроводников происходит в присутствии катализатора формирования H_2 , а окислительная часть реакции осуществляется в одноэлектронном процессе с образованием ОН-радикала. Установлено, что при облучении видимым светом CdS, покрытого CoO и Pt, фоторазложение воды ускоряется в присутствии промежуточного “рабочего тела” – обратимой окислительно-восстановительной системы $K_3Fe(CN)_6 / K_4Fe(CN)_6$.

Ключевые слова: полупроводники, разложение воды, кислород, водород, фотокатализ

DOI: 10.31857/S0044453722010071

В настоящее время все более острой становится проблема загрязнения окружающей среды отходами производства различных предприятий. В основном это сказывается на увеличении концентрации CO₂ в атмосфере, что вызывает парниковый эффект на поверхности Земли, а это чревато перегревом планеты. Во всем мире ведутся исследования, направленные на получение альтернативных экологически чистых источников энергии. Такой альтернативой является солнечная энергия (СЭ). Поэтому использование СЭ относится к наиболее важным глобальным проблемам человечества [1]. Одним из путей создания искусственного преобразователя световой энергии в энергию химического топлива является фотокаталитическое разложение воды на H_2 и O_2 в присутствии полупроводниковых (ПП) материалов [2]. На их основе могут быть созданы ПП-модели природного фотосинтеза [2, 3], осуществляющие фотолиз воды под действием видимого света. Первые работы по ПП-преобразователям появились сразу после осуществления фотоэлектролиза воды на H_2 и O_2 при освещении окисно-титанового ПП-электрода [3–5]. В результате этой фотоэлектрохимической реакции происходит запасание энергии солнечного света в виде химического топлива – водорода. Создание химической модели окисленного фотосинтеза сдерживается из-за отсутствия достаточно эффективно работающей молекулярной конструкции, позволяющей

предотвратить быструю рекомбинацию фотогенерированных зарядов противоположного знака. Именно с задачей разделения зарядов прекрасно справляются ПП-преобразователи. Реакция разложения воды на поверхности ПП до сих пор вызывает повышенный интерес [6–12].

Фотоэлектролиз воды при облучении электродов из ПП-окислов был подробно изучен в работах [13–16]. Было показано, что эффективность процесса фотоэлектролиза на одной и той же поверхности резко возрастает при платинировании ПП-материала с целью снятия большого водородного перенапряжения.

Под действием кванта света в ПП-материале образуются свободные электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Эти элементарные восстановители и окислители могут быть использованы в редокс-реакциях. Таким образом, на поверхности ПП-веществ могут быть осуществлены все фотохимические реакции, которые протекают в химических молекулярных системах. В отличие от фотоэлектрохимических ячеек (ФЭЯ), где можно за счет внешнего источника менять уровень Ферми в ПП-электроде, мы рассмотрим лишь такие вещества, которые способны в принципе осуществлять фоторазложение воды без приложения дополнительного напряжения на электроды.

В настоящей работе приводятся результаты изучения фоторазложения воды на H_2 и O_2 на мо-

дифицированных окисно-титановых ПП (Ru/SrTiO₃ и Pt/TiO₂) при облучении их УФ-светом и на Pt,CoO/CdS при облучении видимым светом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные соединения: бидистиллированная вода, SrCl₂ · 6H₂O “ч”, TiCl₄ “ч”, (NH₄)₂CO₃ “ос.ч”, Cd(NO₃)₂ · 4H₂O “Flucka”, Ru(OH)Cl₃ “Merck”, K₂PtCl₆ “Merck” – использовали без дополнительной очистки.

Приготовление полупроводников

TiO₂ (анатаз) получен по методике [17]. К 100 мл раствора сульфата титана, содержащего 0.9 моль/л Ti(IV) и 1.43 моль/л H₂SO₄, добавили 13.7 мл концентрированной H₂SO₄. После прибавления к этому раствору избытка сульфата аммония (21.7 г) раствор оставили на 24 ч для кристаллизации. После фильтрования осадок отмыли водой три раза, этанолом и сушили на воздухе, затем прокаливали при $t = 750^\circ\text{C}$ 3 ч. Полученный образец имел белый цвет.

Титанат стронция SrTiO₃ синтезировали по методике [18] совместным осаждением Sr и Ti из эквимольной смеси их хлоридов раствором карбоната аммония в интервале pH 7.3–8.2. После фильтрации и отмывания водой от ионов Cl⁻ образец прокаливали при 1200–1250°C в течение 5 ч, образуется поликристаллический SrTiO₃ белого цвета стехиометрического состава со структурой перовскита.

CdS получен соосаждением Cd(NO₃)₂ · 4H₂O с Na₂S. Эквимольное количество раствора Na₂S добавили к раствору Cd(NO₃)₂ · 4H₂O по каплям при перемешивании в течение 1 ч. Полученный осадок желтого цвета отфильтровали и промыли несколько раз дистиллированной водой, затем сушили при 80°C в течение 24 ч.

Оксид кобальта получали из Co(NO₃)₂ · 6H₂O нагреванием до 250°C с последующим прокаливанием при 950°C при скорости нагрева 5°C в течение 3 ч.

Приготовление катализатора Pt/TiO₂. Нанесение Pt на поверхность TiO₂ проводили по методике [13] фотохимическим восстановлением водного раствора K₂PtCl₆ под действием УФ-света. В кварцевый реактор с магнитной мешалкой загружали суспензию TiO₂ с рассчитанным количеством K₂PtCl₆. Суспензию облучали лампой ДРШ-1000 до обесцвечивания раствора. При этом металлическая платина полностью оседала на поверхность ПП. Далее фильтровали осадок, промывали бидистиллированной водой (3 × 50 мл) и сушили на воздухе, а затем в вакууме 15 ч. Аналогично наносили металлический рутений из

Ru(OH)Cl₃ на SrTiO₃. К суспензии SrTiO₃ добавили кислый раствор Ru(OH)Cl₃ и облучали суспензию 20 мин при 60°C. После фильтрации твердый продукт промывали водой, этанолом и сушили при 130°C 3 ч.

Катализатор CoO/CdS готовили смешиванием CoO с CdS в агатовой ступке, затем прокаливали при 1000°C 2 ч с последующим дополнительным прокаливанием при 1200°C в течение 1.5 ч.

Фотоосаждение металлической Pt на CoO/CdS проводили в кварцевом реакторе объемом 30 мл с плоским окном диаметром 3.6 см. К суспензии CoO/CdS добавили раствор K₂PtCl₆, растворы продували аргоном, затем дегазировали на вакуумной установке и облучали УФ-светом.

Источником света служила ртутная лампа сверхвысокого давления ДРШ-1000. Для выделения нужной длины волны использовали интерференционные и стеклянные светофильтры. Для предотвращения разогрева образца под действием света применялся водный фильтр – слой толщиной 10 см. Интенсивность падающего на образец света определялась по методике [19] с помощью ферриоксалатного актинометра ($I_0 = 1.9 \times 10^{-7}$ Э/с). Квантовый выход O₂ (H₂), равный отношению скорости образования O₂ (H₂) к числу поглощенных фотонов (I_0), определяли по формуле $\gamma = w_0/I_0$. Газообразные продукты фотореакции определяли хроматографически с помощью насоса Теплера и хроматографа ЛХМ-8МД с катарометром, длина колонки 2 м, заполненная цеолитом 5А, газ-носитель – гелий. Чувствительность хроматографа порядка 10⁻⁹ моля по O₂ и 10⁻¹⁰ моля по H₂.

pH раствора измеряли pH-метром pH-400 с комбинированным электродом (АКВИЛОН, Москва). pH раствора варьировали добавлением в реакционную смесь 1 М H₂SO₄ и 0.1 М NaOH в пределах pH от 0 до 13.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фотокаталитическое разложение воды на модифицированных полупроводниковых материалах Ru/SrTiO₃ и Pt/TiO₂ при облучении их УФ-светом

Скорость фотокаталитического образования H₂ и O₂ сильно зависит от pH раствора (рис. 1).

При pH < 2 реакция вообще не идет. Возможно, отсутствие реакции при pH < 2 связано с перезарядкой поверхности частицы Pt/SrTiO₃ в кислых растворах. Вид кислородной кинетической кривой при фотолизе воды зависит от многих факторов. Так, при замене осажденной на поверхность платины родием в щелочной среде наблюдается значительно меньшая фотоадсорбция O₂, а при добавлении в раствор соли Na₂CO₃ при pH 6 увеличивается скорость выделения H₂, а так-

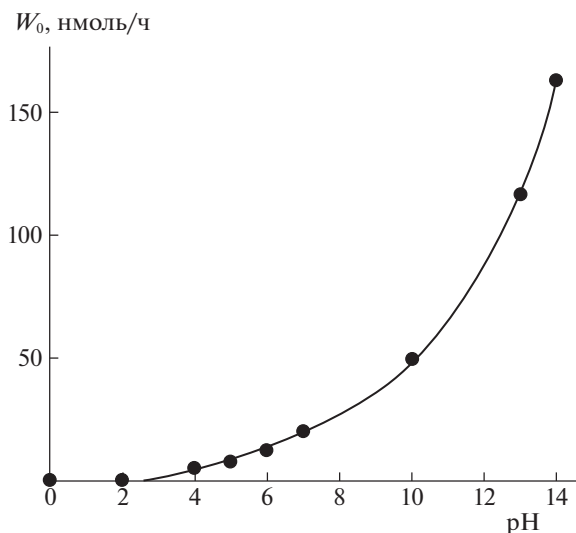


Рис. 1. Зависимость скорости фоторазложения воды от pH среды при облучении УФ-светом суспензии Pt/SrTiO₃; условия: 0.1 г SrTiO₃ с 0.4 ат. % Pt в 20 мл воды, комнатная температура.

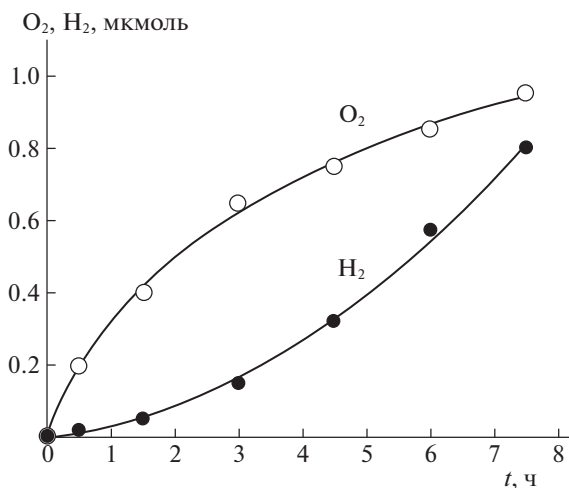
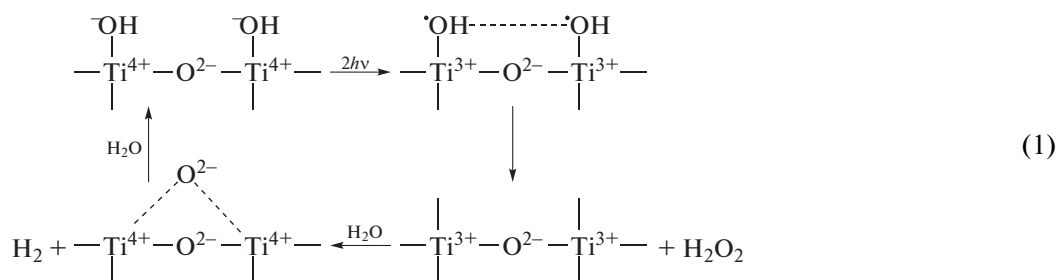


Рис. 2. Кинетика выделения H₂ и O₂ при облучении ПП-суспензии Ru/SrTiO₃ УФ-светом в присутствии акцептора электрона K₂PtCl₆; условия: 74 мг Ru/SrTiO₃, модифицированного 0.1 ат. % Ru, 3 мкмоль K₂PtCl₆ в 20 мл, комнатная температура, pH 13.

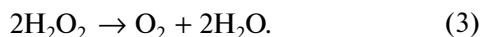
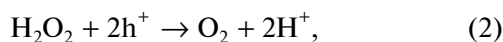
же сокращается время появления кислорода в газовой фазе.

В изучаемых окисных ПП-образцах дырки в валентной зоне способны окислять воду одно-

электронно с образованием ОН-радикалов. Далее ОН-радикалы могут рекомбинировать в перекись водорода, образование которой происходит по реакции (1) [20]:



Образование O₂ возможно либо при дальнейшем окислении H₂O₂, либо при диспропорционировании ее по реакциям:



При фоторазложении воды в водных суспензиях TiO₂ электрохимическими методами было доказано образование H₂O₂ на первых стадиях процесса [20]. Одновременное выделение H₂ и O₂ при фотолизе ПП-суспензии можно наблюдать в присутствии ионов переменной валентности. На рис. 2 приведены кинетические кривые выделения H₂ и O₂ в газовой фазе при облучении суспензии Ru/SrTiO₃ в присутствии 3 мкмоль K₂PtCl₆.

Видно, что в начале идет довольно эффективно полуреакция окисления воды акцептором

электрона с выделением O₂, однако постепенно начинает увеличиваться скорость генерирования H₂. Далее темпы образования H₂ не снижаются, тогда как O₂ в газовую фазу выходит все в меньших количествах. Такое поведение можно объяснить распадом образующейся в системе перекиси водорода, катализированной ионами платины. По мере фотоосаждения платины из K₂PtCl₆ на поверхности SrTiO₃ этот распад замедляется и O₂ уже не так быстро накапливается в газовой фазе, хотя процесс разложения воды идет с прежней скоростью, на что указывает скорость образования H₂ (которая после 5 ч реакции остается постоянной).

Аналогичная картина наблюдается и при облучении УФ-светом суспензии Pt/TiO₂ в присутствии 3 мкмоль Ru(OH)Cl₃, как показано на рис. 3. Здесь также скорость выделения O₂ в газовую фазу постепенно снижается, хотя H₂ продолжает

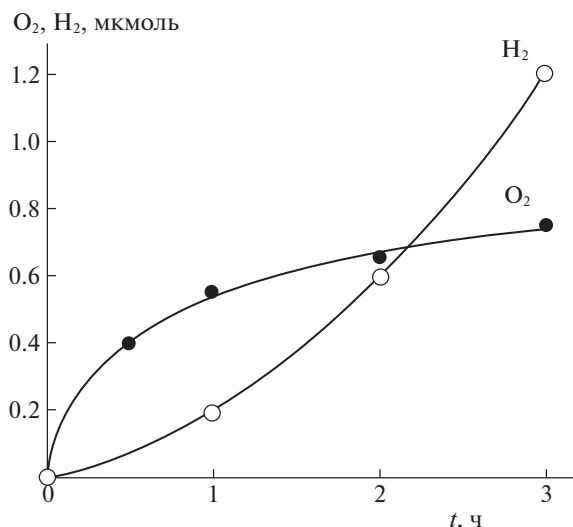


Рис. 3. Образование H₂ и O₂ при облучении ПП-суспензии Pt/TiO₂ УФ-светом; условия: 80 мг Pt/TiO₂ (анатаз), 3 мкмоль Ru(OH)Cl₃ в 20 мл, комнатная температура, pH 4.5.

выделяться с почти постоянной скоростью после 5 ч фотолитиза. Очевидно, что в обоих случаях O₂ выделяется за счет распада H₂O₂ по реакциям (2) и (3). Для коллоидных частиц Pt/TiO₂ было подтверждено, что перекись остается связанной с коллоидными частицами [21]. В конце длительного опыта с выделением 0.7 мл H₂ в системе в связанном состоянии была обнаружена перекись водорода в количестве около 80% от стехиометрического.

Таким образом, фотокаталитическое разложение воды на поверхности широкозонных ПП требует обязательного присутствия катализатора формирования молекулы H₂, а образование O₂ осуществляется в одноэлектронном процессе без участия специального катализатора формирования O₂.

Эффективность полного фоторазложения воды значительно уступает эффективностям полуреакций окисления или восстановления воды в присутствии акцепторов или доноров электрона на этих же материалах. Квантовый выход фоторазложения воды составляет 1.3%. Связано это с обратными реакциями рекомбинации фотогенерированных зарядов, воспрепятствовать которым можно пространственным разобщением двух полуреакций, как это имеет место в ФЭЯ, где окисление воды осуществляется на фотоаноде, а восстановление протонов среды идет на противозлектроде. Пространственно разобщенными являются и противоположные стороны ПП-частицы, на освещенной стороне которой, допустим, вода окисляется, тогда как электроны могут поступать на металлический островок, расположенный на противоположной стороне частицы, где в темновом процессе высвобождается H₂. В этом случае возможности обратной и перекрестных реакций возрастают, что снижает суммар-

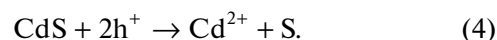
ный квантовый выход желаемого многоэлектронного процесса фотолитиза воды на H₂ и O₂. Кроме того, необходимость вовлечения в процесс металлического катализатора приводит к дополнительным потерям в эффективности реакции, т.к. металлическое покрытие является центром рекомбинации фотогенерированных дырок с электронами.

Фотокаталитическая реакция разложения воды в полупроводниковой суспензии Pt, CoO/CdS под действием видимого света

Полупроводниковые преобразователи, работающие в УФ-области спектра излучения Солнца, не будут иметь практического применения из-за малой доли УФ-света. Поэтому такие свойства широкозонных окисных ПП-материалов, как химическая и фотокоррозионная стойкость, к сожалению, не могут быть полезными с этой точки зрения. Чтобы как-то увязать полезные свойства широкозонных ПП с неудобным для них спектром излучения Солнца, делались многочисленные попытки сенсibilизировать эти материалы к видимому свету. Наиболее распространенным методом фотосенсibilизации широкозонных ПП к видимой области является нанесение на поверхность красителей или других рецепторов, поглощающих кванты света с λ > 400 нм [22].

Мы проверили возможность сенсibilизации ПП-суспензий таким методом, однако не наблюдали заметных скоростей фоторазложения воды на видимом свете. Активности не проявили ни TiO₂ с малыми добавками Ni, Co или Cr, ни индивидуальные соединения NiTiO₃, CoTiO₃, FeTiO₃ и CrTiO₃. Хотя можно было наблюдать фотоокисление воды в присутствии акцепторов электрона с помощью квантов света с энергией меньше ширины запрещенной зоны чистого SrTiO₃ (ΔE_g = 3.2 эВ), если на SrTiO₃ нанести 2% CoO. В этом случае скорость процесса была меньше, чем при межзонном переходе электрона.

Неудачи с сенсibilизацией широкозонных окисных ПП к видимому свету заставляют продолжать поиск подходящих материалов среди других классов ПП, одним из которых является CdS. Нежелательное свойство этого материала заключается в том, что он при облучении подвергается фотокоррозии. Дырки, образованные в валентной зоне, мигрируют к поверхности, где происходит фотокоррозия по реакции :



В литературе можно найти достаточное число работ, в которых авторам удалось в большей или меньшей степени защитить CdS от фотокоррозии разными методами, в том числе модифицированием поверхности различными металлами или оксидами металлов [7, 23]. Мы попытались защи-

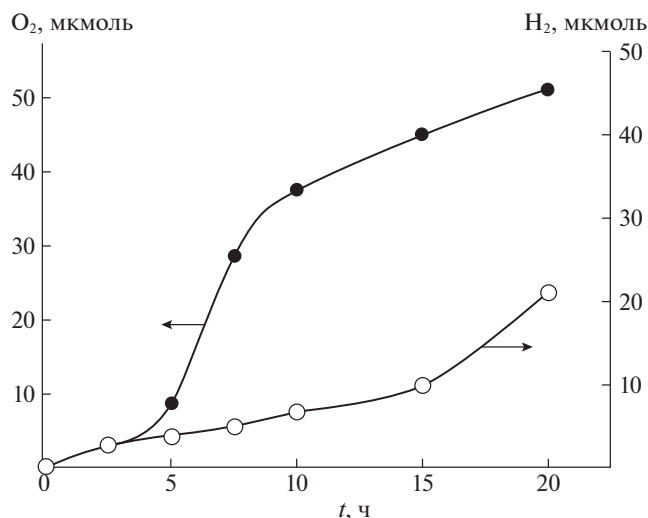
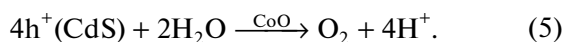


Рис. 4. Кинетика образования H_2 и O_2 при облучении водной суспензии Pt, CoO/CdS видимым светом ($\lambda > 420$ нм); условия: 80 мг CdS покрытый CoO (2 ат. %) и Pt (0.4 ат. %) в 20 мл водной суспензии, pH 13, комнатная температура.

тить CdS *n*-типа от фотокоррозии нанесением на поверхность CoO, который предотвращает его фоторазложение путем стимулирования процесса окисления воды по реакции



На рис. 4 приведены кинетические кривые одновременного образования как H_2 , так и O_2 при облучении водной суспензии CdS, покрытой окисью кобальта и металлической Pt, видимым светом (светофильтр ЖС-11, $\lambda > 420$ нм), что подтверждает фотокаталитическое разложение воды.

Скорость накопления O_2 постепенно снижается и стехиометрического соотношения $\text{H}_2 : \text{O}_2$ не наблюдается. Соотношение скоростей образования O_2 и H_2 во многих случаях ниже теоретического стехиометрического соотношения 1 : 2 разложения воды, что связано с тем, что образующийся O_2 или его предшественник поглощаются нанесенным металлом с образованием пероксидных комплексов [23, 24]. Полагаем, что фотогенерированные электроны восстанавливают протоны среды на платиновых островках, нанесенных на поверхность, а дырки окисляют кобальт до Co(III) и Co(IV). Высокоокисные состояния кобальта выделяют O_2 аналогично тому, как это имеет место в гомогенных водных растворах. Квантовый выход разложения воды на Pt, CoO/CdS равен 1.0%. Схема фотокаталитического разложения воды на CdS с нанесенными Pt и CoO приведена на рис. 5.

Если на поверхность CdS наносится только металлическая платина, то при облучении суспензии через светофильтр ЖС-11 никаких видимых изме-

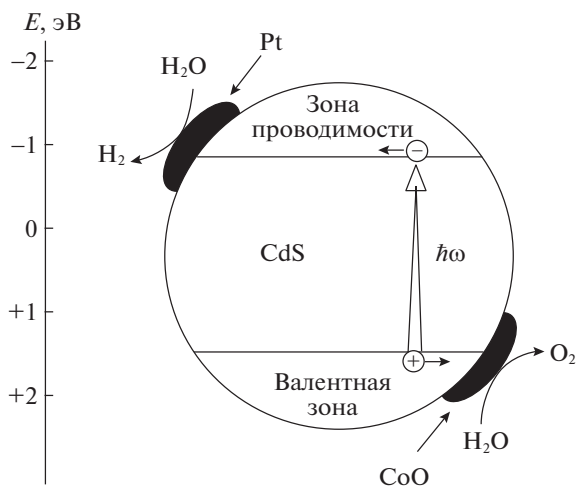


Рис. 5. Схема фотокаталитического разложения воды на модифицированном полупроводнике Pt, CoO/CdS.

нений не происходит и никакие газы не выделяются. Однако в присутствии донора электрона $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ наблюдается выделение H_2 с одновременным окислением его. На рис. 6 изображена кинетика накопления H_2 при облучении Pt/CdS видимым светом, а также небольшое поглощение O_2 , связанное с восстановлением его в H_2O_2 .

Полученные результаты показывают, что запасаение СЭ в виде химического топлива можно осуществлять в ПП суспензиях в двухступенчатом процессе с использованием “рабочего тела” – в данном случае редокс-системы $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6/\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. На первой стадии под действием видимого света на Pt/CdS вода восстанавливается в H_2 в присутствии $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ с одновременным окислением “рабочего тела” (ПП-модель ФС I фотосинтеза). На второй стадии под действием видимого света вода окисляется на поверхности ПП в O_2 в присутствии акцептора электрона, т.е. в присутствии окисленного “рабочего тела” $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (ПП-модель ФС II фотосинтеза). Эту систему можно назвать двухстадийной ПП-моделью кислородно-го фотосинтеза для видимого света.

Для исключения из реакционной последовательности промежуточных атомов Н и радикальных продуктов окисления воды мы использовали путь, близкий к природному процессу фотосинтеза. Суть его состоит в объединении фотогенерирования одноэлектронных окислителей и восстановителей с коллективным многоэлектронным катализом [24]. Получающиеся под действием квантов света окислители или восстановители, недостаточно сильные для осуществления одноэлектронных процессов окисления или восстановления воды, проводят с помощью катализатора соответствующие четырех- или двух-электронные реакции. Катализ многоэлектрон-

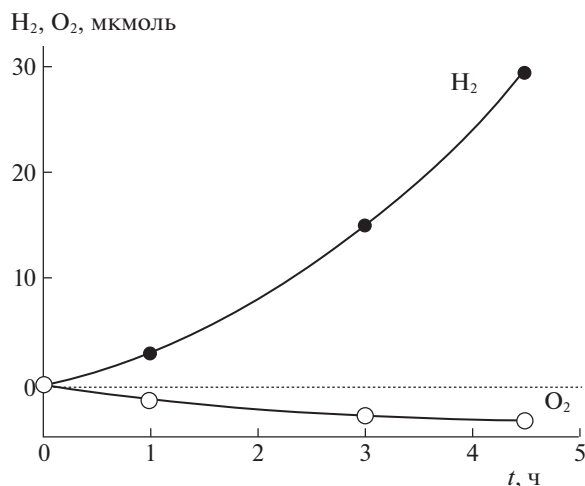


Рис. 6. Образование H₂ при облучении водной суспензии Pt/CdS видимым светом в присутствии донора электрона K₄Fe(CN)₆; условия: 80 мг CdS, модифицированной только Pt (0.4 ат. %), 10⁻³ М K₄Fe(CN)₆ в 20 мл водной суспензии. Облучение лампой ДРШ-1000 через светофильтр ЖС-11 (λ > 420 нм), pH 13, комнатная температура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Н.Н. Молодежь и будущее. М.: Вектор – ТиС, 2010. 260 с.
2. Гуревич Ю.А., Плесков Ю.В. Фотоэлектрохимия полупроводников. М.: Наука, 1983. 312 с.
3. Bard A.J. // J. Photochem. 1979. V. 10. P. 59. [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(79\)80037-4](https://doi.org/10.1016/0047-2670(79)80037-4)
4. Fujishima A., Honda K. // Bull. Chem. Soc. Japan. 1971. V. 44. P. 1148.
5. Красновский А.А. Преобразование энергии света при фотосинтезе. М.: Наука, 1974. 64 с.
6. Patial S., Hasija V., Raizada P. et al. // J. Environmental Chem. Engineering. 2020. V. 8. № 3. P. 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103791>
7. Ning X., and Lu G. // Nanoscale. 2020. V. 12. P. 1212. <https://doi.org/10.1039/C9NR09183A>
8. Chen Y., Yu G., Chen W. et al. // J. Amer. Chem. Soc. 2017. V 139. P. 12370. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b06337>
9. Matheu R., Moreno-Hernandez I.A., Sala X. et al. // Ibid. 2017. V. 139. P. 11345. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b06800>
10. Willinger E., Massue C., Schlogel R., Willinger M.G. // Ibid. 2017. V. 139. P. 12093. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b07079>
11. Lin Y., Yuan G., Liu R. et al. // Chem. Phys. Letters. 2011. V. 507. P. 209. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2011.03.074>
12. Grätzel M. // Accounts Chem. Res. 2009. V. 42. № 11. P. 1788. <https://doi.org/10.1021/ar900141y>
13. Lehn J.-M., Sauvage J.-P., Ziessel R. // Nouv. J. Chim. 1984. V. 4. № 11. P. 623.
14. Wrighton M.C., Wolezanski P.T., Ellis A.B. // J. Solid State Chem. 1977. V. 22. № 1. P. 17.
15. Hachimoto K., Kawai T., Sakata T. // Nouv. J. Chim. 1983. V. 7. P. 249.
16. Kalyanasundaram K., Borgarello E., Grätzel M. // Helv. Chim. Acta. 1981. V. 64. № 35. P. 362.
17. Горощенко Я.Г. Химия титана. Киев: Наукова думка, 1970. 416 с.
18. Лимарь Т.Ф., Уварова К.А., Булачева А.Ф. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1965. Т. 10. № 2. С. 350.
19. Введение в фотохимию органических соединений / Под ред. Г.О. Беккера. Л.: Химия, 1976. 384 с.
20. Somorjai G.A. // Chem. Soc. Rev. 1984. V. 13. P. 321.
21. Muraki H., Saji T., Fujihira M. // V International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy. Osaka. Japan. 1984. Book of Abstracts. P. 138.
22. Grätzel M. // Accounts Chem. Res. 1981. V. 14. № 12. P. 376.
23. Dounghong D., Grätzel M. // J. Chem. Soc., Chem. Commun. 1984. № 23. P. 1597.
24. Liu J., Zhong Y., Lu L., Wu G., Chen W. // Chem. Commun. 2012. 48. P. 8826. <https://doi.org/10.1039/c2cc33544h>
25. Семенов Н.Н., Шилов А.Е., Лихтенштейн Г.И. // Докл. АН СССР. 1975. Т. 221. № 6. С. 1374.

ных процессов осуществляется в соответствии с принципом экономного расходования энергии по координате реакции [25].

Таким образом, изучены фотоиндуцированные реакции разложения воды в суспензиях модифицированных полупроводниковых материалов (Pt/TiO₂, Ru/SrTiO₃, Pt,CoO/CdS). Титанокисные материалы требуют присутствия катализатора формирования H₂, тогда как O₂ получается через ОН-радикалы. Титан-окисные ПП из-за низкого расположения края валентной зоны фотогенерируют дырки, окисляющие воду одноэлектронно до ОН-радикалов, которые рекомбинируют в H₂O₂ с последующим образованием O₂ без катализаторов формирования этих продуктов. В случае CdS необходимы катализаторы образования как H₂, так и O₂ из фотогенерированных электронов и дырок. Предложена двухстадийная (в случае Pt,CoO/CdS) модель фотосинтеза с промежуточным “рабочим телом” — обратимой окислительно-восстановительной системой K₃Fe(CN)₆/K₄Fe(CN)₆, позволяющая разлагать воду на H₂ и O₂ под действием видимого света.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А19-119071190045-0 с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ИПХФ РАН.