

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)  
6D060400-Физика

ЖУМАБЕКОВ АЛМАР ЖУМАГАЛИЕВИЧ

### Влияние примеси оксида графена на фотоэлектрические и фотокаталитические свойства пленок $\text{TiO}_2$

**Актуальность темы.** Экологическая чистота энергетических технологий является чрезвычайно важным вопросом, что обуславливает повышенное внимание к возобновляемым источникам энергии, в частности, к водородной энергетике. Использование водородной энергии имеет много преимуществ, к которым можно отнести доступность, неисчерпаемость, полная безопасность для окружающей среды. Однако, несмотря на огромный потенциал и широкие перспективы, лишь небольшая часть этой энергии используется человечеством. Это связано с рядом нерешенных проблем. Производство водородного топлива  $\text{H}_2$  путем преобразования солнечной энергии считается одной из основных стратегий решения глобальной энергетической проблемы.

Фотоэлектрохимическое расщепление воды на электроде  $\text{TiO}_2$  начало положили Fujishima и Honda. С тех пор вопрос о возможности производства фотокаталитического  $\text{H}_2$  привлекает пристальное внимание. Для этой цели были исследованы различные полупроводниковые фотокатализаторы, такие как  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{C}_3\text{N}_4$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{BiVO}_4$ . Следует отметить, что диоксид титана занимает особое место из-за его физических и оптических свойств, таких как высокая температура плавления, химическая инертность, высокая эффективность фотопреобразования и фотостабильность.

Большинство перечисленных материалов обладают широкой запрещенной зоной, фотокоррозией и низкой эффективностью разделения электронно-дырочных пар. Для решения этих проблем проводят легирование полупроводника металлами и неметаллами, создают на его основе композиты, наносят благородные металлы на поверхность полупроводника, изготавливают гетеропереходы, квантовые точки и проводят сенсбилизацию красителями.

Среди перечисленных подходов создание композитных материалов является наиболее перспективным методом улучшения характеристик полупроводника. Формирование композитов на основе других полупроводников, металлов и углеродных материалов снижает скорость рекомбинации, увеличивает способность разделения заряда и транспортную способность  $\text{TiO}_2$ .

Графен и его модификации с  $sp^2$  гибридизацией широко используются в энергетике и материалах окружающей среды, таких как сохранение солнечной

энергии, фотовольтаика, фотоэлектрохимическая и фотокаталитическая генерация водородородного/углеводородного топлива и фотокатализ органических загрязнений. В последние годы композиты на основе  $\text{TiO}_2$  и графена с его модификациями привлекает большое внимание для улучшения разделения заряда и транспортировки электронов.

Однако, использовать графен в качестве прекурсора для синтеза нанокompозита с  $\text{TiO}_2$  достаточно сложно ввиду отсутствия функциональных реакционных групп. Для решения этой проблемы более подходящими являются оксид графена (GO) и восстановленный оксид графена (rGO).

Многие стратегии синтеза, в основном, сосредоточены на создании нанокристаллов  $\text{TiO}_2$  с желаемого размера и морфологии с их последующей модификацией и нанесением их на поверхность графеновых листов. Однако эти гибридные материалы имеют недостатки. Их размер слишком мал, чтобы их можно было легко агломерировать. При этом во время процесса фоторазложения органических соединений эффективная площадь поверхности  $\text{TiO}_2$  и графена такого гибридного материала может значительно уменьшиться.

Поэтому метод гидротермального синтеза нанокompозитов на основе модификаций графена и  $\text{TiO}_2$  кажется наиболее простым и технологичным для практического использования. Литературные данные показывают, что нанокompозитные материалы, полученные гидротермальным методом, являются наиболее эффективным фотокатализатором для выделения  $\text{H}_2$ .

**Целью** диссертационной работы является исследование влияния производных графена на электрофизические и фотокаталитические свойства пленок  $\text{TiO}_2$ .

**Объектами исследования** являются нанокompозитные пленки на основе диоксида титана, оксида графена, восстановленного оксида графена и НЧ серебра.

**Научная новизна** включает следующее:

- 1) впервые синтезирован гидротермальным методом нанокompозитный материал на основе восстановленного оксида графена и  $\text{TiO}_2$ ;
- 2) установлено, что генерируемый фотоиндуцированный ток намного больше в нанокompозитных материалах, чем в пленках на основе НЧ  $\text{TiO}_2$ ;
- 3) впервые получен тройной нанокompозитный материал на основе производных графена,  $\text{TiO}_2$  и наноструктуры  $\text{Ag/TiO}_2$  с улучшенными фотокаталитическими и зарядо-транспортными свойствами;
- 4) предложена технологически оптимальная конфигурация фотодетектора на основе нанокompозитных материалов и способ увеличения их оптоэлектронных характеристик под действием плазмонного эффекта НЧ серебра.

**Структура и объем диссертации.** Структура диссертационной работы определена поставленными задачами и состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографии. Она изложена на 102 страницах машинописного

текста, иллюстрируется 42 рисунками, 12 таблицами, содержит список цитируемой литературы из 222 наименований.

**Основные результаты включают следующее:**

1. Добавление производных графена в пленки  $\text{TiO}_2$  способствует увеличению генерируемого фотоиндуцированного тока и повышению фотокаталитической активности полупроводника.

2. Допирование нанокompозитного материала наноструктурами «ядро–оболочка» состава  $\text{Ag/TiO}_2$  позволяет получить высокоэффективный фотокатализатор под действием локализованного плазмонного резонанса.

3. Использование 3D нанокompозитов в сочетании с плазмонными наночастицами увеличивает фотоэлектрические характеристики детекторов благодаря высокой подвижности носителей заряда.

**Научно-практическая значимость работы:**

Полученные нанокompозитные материалы могут быть использованы в качестве основного элемента в качестве фотокатализаторов в электрохимических и фотовольтаических ячейках и газовых анализаторах. Результаты по влиянию производных графена на фотокаталитическую активность и электрофизические свойства, а также результаты исследования электротранспортных свойств нанокompозитных пленок могут стать основой при разработке фотодетекторов.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: международная научно–техническая конференция «Russian-Japanese Conference Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials» (2018, Orenburg); международный научный симпозиум «Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов» (2018, Алматы); XIV международная научная конференция, посвященный 80-летию основателя конференции профессора Т.А. Кукетаева – «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии (ФТТ-2018)» (2018, Бишкек-Караганда), Journal open press conference series «Materials Science and Engineering» (2018); Сборник трудов X международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018» (2018, Санкт-Петербург); «VIII международной конференции по фотонике и информационной оптике» (2019, Москва); «International Symposium Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies» (2019, Saint-Petersburg); Материалы V Международной научно-практической конференции «V Global science and Innivations 2019: Central Asia» (2019, Нур-Султан), The 7<sup>th</sup> International Conference on nanomaterials and advanced energy storage systems (INESS-2019) (2019, Алматы); 11<sup>th</sup> International Conference «Chaos and structures in nonlinear systems. Theory and Experiment» (2019, Karaganda); Аль-Фараби в современном казахстанском контексте. «Международная научно-практическая конференция, посвященная 1150-летию Абу Насра ибн аль-Фараби» (2020, Караганда).

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 22 печатная работа: 4 статьи в журналах, входящих в базу Thomson Reuters и Scopus (1 статья в Russian Journal of Physical Chemistry A, IF–0,72, 1 статья в Theoretical and Experimental Chemistry IF-0,48, 1 статья в Materials Research Express IF-1,93 и 1 статья в Optics and Spectroscopy, IF–0,84); 4 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК, и 14 публикаций в материалах международных конференций, в том числе 1 статья в странах дальнего зарубежья.