ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сунь Чжилэй «Закономерности формирования пленок оксинитридов титана методом магнетронного распыления, их структурные особенности и свойства», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертационной работы.

Одной из важных областей применения тонкоплёночных покрытий на основе диоксида титана является электроника, солнечная энергетика, деградация загрязняющих веществ, фотокатализ, сердечно-сосудистая хирургия.

Использование метода реактивного магнетронного распыления позволяет получать плёнки TiO_2 с составом, представляющим смесь фаз анатаза и рутила. Анатаз обладает высокой фотокаталитической активностью и фотоиндуцированной гидрофильностью, а рутил обладает высокой термостабильностью. Двойная система анатаз-рутил может демонстрировать многообещающие характеристики в гетерогенном фотокатализе. Получение двухфазной системы с контролируемым содержанием фаз может оказывается возможным посредством контроля параметров осаждения.

Зависимость структурообразования и свойств TiO_2 и N-TiO_2 плёнок от параметров осаждения является индивидуальной особенностью для каждого режима работы магнетронных распылительных систем, что определяет актуальность данной работы.

Поэтому, диссертационная работа Сунь Чжилэй, посвящённая разработке условий осаждения и исследованию их влияния на структурные особенности и свойства азотсодержащих TiO_2 плёнок является **актуальной**, и представляет научный и практический интерес.

Содержание работы

Диссертационная работа Сунь Чжилэй состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемых источников, включающего 237 наименований. Полный объём диссертации – 154 листа машинописного текста, в том числе 85 рисунков и 15 таблиц.

В первой главе приведён литературный обзор, в котором представлены сведения о структурообразовании диоксида титана, его свойствах, областях применения тонких плёнок на его основе. Перечислены методы получения плёнок диоксида титана и обсуждаются возможности метода реактивного магнетронного распыления (МР) при формировании плёнок и покрытий. Приводятся литературные данные о влиянии режимов распыления на

структуру и свойства пленок оксинитридов титана, осажденных методом МР. Показана возможность применений TiO2 как фотокатализатора деградации загрязнений и разделение воды Обоснована актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования.

Обзорный материал в этой главе представлен в необходимом количестве и позволяет получить достаточно полную картину по проблеме создания пленок на основе оксинитридов титана методом магнетронного распыления

Обзор литературы написан достаточно критично. Из приведенного литературного обзора логически следует постановка задачи исследования. Несомненно, что Сунь Чжилэй хорошо знаком с областью научного направления, в котором он работает. Анализ первой главы позволяет заключить, что диссертант является хорошо подготовленным специалистом в избранной области.

Во второй главе описано технологическое оборудование, используемое для осаждения пленок, режимы осаждения азотсодержащих плёнок диоксида титана, экспериментальные и теоретические методы их исследования. Обоснован выбор материалов подложек, приведены экспериментальные результаты исследования параметров плазмы. Приведены методы обработки результатов исследований.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния условий формирования на структурные изменения, морфологические особенности, физико-химические свойства осаждённых N-TiO_2 плёнок, осажденных при удельной мощности 2,7 Вт/см^2. Установлена зависимость структурных и морфологических характеристик от состава рабочей газовой атмосферы. Приведены данные о значениях ширины запрещенной зоны полученных пленок и влиянии термического отжига на физико-химические характеристики пленок.

Несомненно, важное практическое значение имеют результаты **четвертой главы,** в которой приведены результаты исследований характеристик, структурных особенностей и свойств пленок TiO_2 и N-TiO_2, осажденных при мощности разряда 5,4 Вт/см^2. В результате исследований установлены режимы и условия распыления, позволяющие сформировать покрытия с заданным фазовым составом: однофазную пленку со структурой анатаза, пленку с двухфазной структурой, однофазную пленку со структурой рутила. Представлены данные о влиянии легирования азотом и последующего термического отжига на ширину запрещённой зоны. Определены

характеристики смачиваемости поверхности плёнок в зависимости от их фазового состава, а также влияние уровня легирования азотом и термического отжига на величину контактного угла смачивания.

Пятая глава является логическим продолжением третьей и четвертой глав. В ней представлены результаты исследований структурных особенностей и свойств пленок TiO_2 и N-TiO_2, осажденных динамическим напылением при последовательном увеличении удельной мощности от 5,4 Вт/см^2 до 8,1 Вт/см^2. Представлены результаты влияния изменения мощности разряда напыления и последующего отжига на структуру и свойства пленок оксинитридов титана. Показано, что фазовый состав осажденных пленок зависит от температуры отжига и от уровня легирования азотом. Исследовано, также, влияние состава рабочего газа, в частности аргона как рабочей компоненты газовой атмосферы и отрицательного смещения на подложке на структуру т свойства пленок оксинитридов титана, осажденного методом МР.

Основные научные результаты и практическая значимость

Новизна. При выполнении работы Сунь Чжилэй получены новые результаты, определяющие её высокую **научную новизну и практическую значимость**, из которых можно выделить следующие:

- Установлено, что повышение мощности плазменного разряда и изменение состава рабочего газа не оказывает существенного влияния на параметры плазмы.
- Экспериментально установлено, что фазовый состав азотсодержащих плёнок оксида титана зависит от условий осаждения, а именно, от состава рабочей газовой атмосферы.
- Экспериментально установлено, что N-TiO_2 пленки, выращенные при удельной мощности 2,7 Вт/см^2 имеют двухфазный состав с гидрофобной поверхностью; термический отжиг приводит к росту гидрофильности поверхности более, чем в 5 раз с увеличением отношения азот/кислород в составе плазмы от 1 до 3.
- Установлены режимы и условия распыления, позволяющие сформировать покрытия с заданным фазовым составом: однофазную пленку со структурой анатаза, пленку имеющую двухфазную структуру, однофазную пленку со структурой рутила.
- Предложена модель фазового перехода анатаз-рутил в N-TiO_2 пленке, обусловленного ростом содержания азота в рабочей атмосфере плазмы магнетронного разряда.

Практическая значимость работы.

Результаты проведённых научных исследований могут быть использованы в разработке технологии формирования тонких азотсодержащих пленок оксида титана которые могут быть использованы в различных областях электроники, солнечной энергетики, фотокатализе, в качестве самоочищающейся пленки, и для модифицирования поверхности медицинских имплантатов.

Обоснованность научных положений и **достоверность** результатов подтверждаются анализом литературных источников, корректностью применения современных методов исследования, включающих электронную микроскопию, рентгеноструктурный анализ. Основные результаты диссертации получили достаточное обсуждение на международных конференциях и в полной мере отражены в научной печати, в числе которых 4 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ, 6 статей в изданиях, входящих в реферативную базу Scopus и WoS. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности.

Материалы диссертации и автореферата соответствуют формуле специальности и пунктам 1, 3 и 4 паспорта научной специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Замечания по работе

1. В рассматриваемой диссертации сделан важный вклад в решение научной задачи по созданию пленок на основе оксинитридов титана методом магнетронного распыления и получен большой объем экспериментальных данных. Однако необходимо отметить недостаточно полный анализ влияния температурных режимов подложки при воздействии различных параметров магнетронного разряда на структурно-фазовый состав осажденной пленки.
2. В диссертации, к сожалению, не представлено «…подробное объяснение, схемы роста пленки в результате N-легирования и последующего отжига…» (стр. 66 диссертации). Нет пояснений, что означает R-связь, A-связь? (Рис. 3-4 диссертации).
3. В тексте встречаются два термина: «азотсодержащая плёнка диоксида титана» (стр. 58 диссертации) и «оксинитридная плёнка титана» (стр. 11 диссертации). Это нужно понимать, как синонимы или размытое определение объекта исследования?
4. В тексте диссертации и автореферата имеются ряд стилистических неточностей и описок. Например, на стр. 105 диссертации автор ссылается на «…таблицу 2…», которой нет; стр. 7 автореферата и стр. 8 диссертации «…работа состоит из … четырех глав…». В действительности работа состоит из 5 глав

Приведённые замечания, тем не менее, не снижают высокую оценку диссертационной работы.

Заключение

По совокупности проведённых исследований и полученных результатов, их актуальности, новизне и достоверности, научной и практической значимости, количеству публикаций, диссертационная работа Сунь Чжилэй «Закономерности формирования пленок оксинитридов титана методом магнетронного распыления, их структурные особенности и свойства» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей значимые научные и практические результаты. Диссертация отвечает требованиям п. 8 и п. 9 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а её автор, Сунь Чжилэй, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Даю согласие на обработку своих персональных данных.

Клопотов Анатолий Анатольевич, профессор,
доктор физико-математических наук,
по специальности 01.04.07 -
физика конденсированного состояния.
Профессор, кафедры
«Прикладная механика и материаловедение»
ФГБОУ ВО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»

Клопотов Анатолий Анатольевич

25.11.2020

Юридический адрес:
ФГБОУ ВО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2
e-mail: klopotovaa@tsuab.ru
Тел.: +7 (3822) 65-07-23

Подпись профессора А.А. Клопотова заверяю,
Ученый секретарь ТГАСУ Ю.А. Какушкин