АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071000 – «Материаловедение и технология новых материалов»

СУЮНДЫКОВА ГУЛНУР СЕРИККАЛИЕВНА
«СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ»

Общая характеристика работы.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов формирования наноструктур карбида кремния, получаемых методами плазмохимического осаждения: высокочастотное реактивное магнетронное распыление и микроволновое плазмохимическое осаждение из газовой фазы.

Основное внимание уделено изучению влияния ключевых параметров плазмохимического синтеза, включая температуру, состав газовой среды, тип металлического катализатора, а также кристаллографическую ориентацию и морфологию кремниевых подложек, на морфологические и структурные характеристики формируемых наноструктур.

Проведённый комплекс экспериментальных исследований позволил установить взаимосвязь между условиями синтеза и параметрами наноструктур 3C-SiC, включая их форму, размеры, плотность распределения, эффективную ширину оптической запрещённой зоны и структурные характеристики.

Актуальность темы.

Наноструктуры карбида кремния (SiC) представляют значительный интерес благодаря сочетанию высокой термической и химической стабильности, механической прочности, радиационной стойкости и широкого диапазона электрофизических свойств. Эти характеристики делают наноструктурированный SiC перспективным материалом для применения в нано- и микроэлектронике, сенсорных системах, высокотемпературных и радиационностойких устройствах, а также в условиях экстремальных внешних воздействий.

Среди большого многообразия наноструктур карбида кремния особое место занимают волокнистые одномерные структуры, обладающие высокой удельной поверхностью, развитой анизотропией свойств и эффективными каналами переноса заряда и тепла. Такие особенности определяют их перспективность для использования в качестве фотоэлементов, активных элементов в фотокаталитических системах получения водорода, сенсоров, армирующей фазы в композиционных материалах и функциональных покрытий.

Несмотря на активное развитие методов синтеза наноструктур SiC, большинство существующих подходов основано на энергоёмких высокотемпературных процессах с использованием органосилановых прекурсоров, что сопряжено с экологическими рисками и сложностью управления морфологией. При этом значительная часть исследований ориентирована преимущественно на формирование плёночных слоёв, тогда как

вопросы управляемого роста волокнистых наноструктур, особенно в низкотемпературных плазмохимических условиях, освещены значительно слабее, что сужает технологические возможности и усложняет практическую реализацию процессов.

В этой связи особый интерес представляют плазмохимические методы осаждения, включая высокочастотное реактивное магнетронное распыление (ВЧРМР) и микроволновое плазмохимическое осаждение из газовой фазы (МВ-ПХОГФ). По сравнению с традиционными подходами данные методы обладают рядом преимуществ, включая возможность снижения температуры синтеза, более гибкое управление составом реакционной среды, отсутствие необходимости использования органосилановых прекурсоров в методе ВЧРМР, а также возможность контроля морфологии формируемых наноструктур.

Вместе с тем анализ научных работ, посвящённых плазмохимическим методам синтеза карбида кремния, показывает, что имеющиеся результаты носят фрагментарный характер и не обеспечивают целостного представления о формировании наноструктур. В частности, остаётся недостаточно систематизированной информация о влиянии типа металлического катализатора, а также кристаллографической ориентации и морфологии кремниевых подложек (гладких и пористых) на процессы формирования наноструктур SiC. Отсутствие комплексных экспериментальных исследований в данном направлении затрудняет целенаправленное управление плотностью, протяжённостью и структурным совершенством формируемых наноструктур.

В связи с этим проведение исследований, направленных на изучение особенностей формирования волокнистых наноструктур карбида кремния в плазмохимических условиях, является актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертационной работы – получение микро- и наноструктур карбида кремния плазмохимическими методами осаждения и установление корреляционных зависимостей между технологическими параметрами синтеза и характеристиками материала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Синтезировать микро- и наноструктуры карбида кремния методами высокочастотного реактивного магнетронного распыления и микроволнового плазмохимического осаждения из газовой фазы.

2. Исследовать влияние параметров высокочастотного реактивного магнетронного распыления (соотношения газов, температуры и ориентации подложки) на характеристики синтезируемые структуры карбида кремния.

3. Исследовать влияние типа металлического катализатора (Ni, Cu), кремниевых подложек (кристаллографической ориентации (100 и 111), морфологии (гладкие и пористые)) и технологических параметров метода МВ-ПХОГФ на характеристики наноструктурированного карбида кремния.

Методы исследования:

Методы исследования включают РФА (фазовый состав и структура), СЭМ (морфология и геометрия), КРС (кристалличность и фононные свойства), ПЭМ с SAED и EDX-анализом (внутренняя структура и элементный состав), а также

спектрофотометрию. Эксперименты проводились при контролируемом варьировании параметров плазмохимического синтеза и типов катализаторов для обеспечения достоверности данных.

Объектом исследования являются наноструктуры карбида кремния, полученные методами высокочастотного реактивного магнетронного распыления и микроволнового плазмохимического осаждения из газовой фазы.

Предметом исследования являются морфологические и структурные характеристики структур SiC и оптимальные технологические параметры их синтеза.

Научная новизна. Впервые:

1. Методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления возможно получение микро- и наноструктур 3C-SiC при температурах подложки 600–700 °C без использования органосилановых прекурсоров.
2. Установлено, что при микроволновом плазмохимическом осаждении из газовой фазы наиболее благоприятные условия для формирования волокнистых наноструктур 3C-SiC реализуются при использовании никелевого катализатора и температуре 700–800 °C, тогда как тип кристаллографической ориентации кремниевой подложки ((100) или (111)) не оказывает существенного влияния на морфологию формируемых структур.
3. Установлено, что использование пористой структуры подложек Si(111) при микроволновом плазмохимическом осаждении из газовой фазы (T ≈ 700 °C) оказывает существенное влияние на морфологию роста наноструктур 3C-SiC. Показано, что в данных условиях вклад морфологии поверхности и кристаллографической ориентации подложки становится превалирующим, уменьшая различия во влиянии никеля и меди на формирование волокон и обеспечивая получение однородных массивов нановолокон с высокой плотностью (~ 40 мкм$^{-2}$).

Положения, выносимые на защиту:

1. Формирование микро- и наноструктур 3C-SiC методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления обеспечивается в газовой среде Ar/C_2H_2 в диапазоне соотношений 1:(0,01–0,03) при температурах подложки 600–700 °C без использования органосилановых прекурсоров
2. Синтез плотных массивов волокнистых наноструктур 3C-SiC методом микроволнового плазмохимического осаждения из газовой фазы на гладких подложках кремния реализуется с использованием никелевого катализатора в температурном диапазоне 700–800 °C в газовой среде тетраметилсилана и водорода
3. Использование пористых кремниевых подложек ориентации (111) с никелевым или медным катализатором в методе микроволновом плазмохимическом осаждении из газовой фазы способствует росту плотных и однородных массивов нановолокон 3C-SiC при температуре ~700 °C в газовой среде тетраметилсилана и водорода.

Научная значимость работы.

Научная значимость диссертационной работы заключается в демонстрации возможности синтеза наноструктур 3C-SiC без использования органосилановых

прекурсоров методами магнетронного распыления и микроволнового плазмохимического осаждения из газовой фазы. В ходе исследования установлено влияние температуры синтеза, типа катализатора и морфологии подложки на параметры роста нанонитей (плотность, длина, упорядоченность) и их структурные особенности.

Практическая значимость работы.

Практическая значимость работы определяется разработкой энергоэффективных, экологически безопасных и управляемых технологических режимов получения наноструктур 3C-SiC. Полученные результаты показывают возможность использования данных наноструктур в кремний-основных тандемных солнечных элементах в качестве широкозонного поглощающего слоя, а также в системах фотокаталитического разложения воды и устройствах силовой наноэлектроники. Результаты исследования могут быть использованы в образовательном процессе при подготовке специалистов в области материаловедения и нанотехнологий, а также служить основой для дальнейших исследований.

Связь диссертационной работы с научно-исследовательскими программами. Диссертационная работа выполнялась в Казахском Национальном университете им. аль-Фараби, основные положения разрабатывались в рамках программы фундаментальных исследований, финансируемых МОН РК по приоритету «Рациональное использование природных в том числе водных ресурсов, геологии, переработка новых материалов и технологии» по теме: AP05132865 «Разработка плазмохимической технологии синтеза наноструктур карбида кремния» (2018–2020 гг.).

Личный вклад диссертанта

Автор лично выполнил постановку задач, планирование экспериментов и модернизацию установки магнетронного распыления. Синтезировал образцы методом магнетронного распыления, а в методе МВ-ПХОГФ принимал ключевое участие в подборе режимов и анализе данных. Весь комплекс структурных и морфологических исследований (РФА, СЭМ, спектроскопия КРС, спектрофотометры) выполнен и интерпретирован автором лично. Научные положения, выводы и публикации в рецензируемых журналах подготовлены соискателем самостоятельно.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы, докладывались и обсуждались:

1. **Suyundykova, G. S.,** Mansurov, B. Z., Partizan, G., Kenzhegulov, A. K., Medyanova, B. S., Aliev, B. A., Zhumadilov, B. E. X-ray Investigation of SiC Nanostructure on Cu Films. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2019. Vol. 11. No. 2. (https://doi.org/10.21272/jnep.11(2).02002). (Scopus percentile 31% Q3)
2. Mansurov B.Z., Kenzhegulov A.K., Medyanova B.S., Partizan G., **Suyundykova G.S.,** Zhumadilov B., Mansurova M.E., Koztayeva U.P., Aliyev B.A. Investigation of SiC and C nanostructures obtained by MWCVD // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2017. Vol. 19. No. 2. P. 165–175. (https://doi.org/10.18321/ectj648). (WoS: IF 1.2, Q3. Scopus percentile 14%)

3. Zhumadilov B., **Suyundykova, G. S.,** Partizan G., Medyanova B., Kenzhegulov A., Aliyev B. Structure and morphology of SiC nanostructures synthesized on Cu films // Materials Today. 2020. Vol. 31. P. 417–420. (https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.385). (Scopus percentile 38%, Q3)
4. **Суюндыкова Г.С.,** Мансуров Б.З., Кенжегулов А.К., Медянова Б.С., Партизан Г., Жумадилов Б.Р., Алиев Б.А. Синтез наноструктур SiC и C на буферном слое Ni методом плазмохимического осаждения // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. 2018. Т. 16. Вып. 2. С. 28–37.
5. **Суюндыкова Г.С.,** Кенжегулов А.К., Мансуров Б.З., Медянова Б.С., Партизан Г. Исследование наноструктур SiC и C, полученных на поверхности буферного слоя меди // Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологии и наноматериалов: материалы V Междунар. науч. конф. Алматы, 2018. С. 287.
6. **Суюндыкова Г.С.,** Кенжегулов А.К., Оспанали А.Т., Медянова Б.С., Партизан Г., Алиев Б.А. СЭМ-исследование наноструктур SiC, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления // Вестник КазНИТУ. Технические науки. 2020. № 3 (139). С. 268–273.
7. Kenzhegulov A.K., **Suyundykova, G. S.,** Mansurov B.Z., Medyanova B.S. Synthesis of SiC nanostructures on the surface of copper films // The Physics and Chemistry of Carbon and Nanoenergetic Materials: proceedings of the X International Symposium. Almaty, 2018. Ch. 7. P. 1.
8. **Суюндыкова Г.С.,** Мансуров Б.З., Кенжегулов А.К., Медянова Б.С. Синтез наноструктур SiC и C на Ni-пленках методом МТ-ПХГФТ // Химическая физика и наноматериалы: материалы III конференции студентов и молодых ученых, посвященной памяти Мансурова Батыра Зулхаировича. Алматы, 2018. С. 32.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа содержит список обозначений и сокращений, введение, основную часть из четырех разделов, заключение и список использованных источников. Объем диссертации составляет 121 страниц машинописного текста, включая 89 рисунков, 7 таблиц, 5 формул и 179 источников использованной литературы.