

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИФФУЗИЯ МАРГАНЦА В КРЕМНИЙ КДБ-3: СТРУКТУРНЫЕ И ПЛАЗМОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

САИДОВ САФО ОЛИМОВИЧ¹, КОСИМОВ ИСРОИЛ ОДИАЕВИЧ²

**¹БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, КАФЕДРА
ФИЗИКИ, БУХАРА, РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН**

**²ИНСТИТУТ БИООРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА
А.С. САДЫКОВА АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН,
ТАШКЕНТ, РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН**

В данной работе исследуется влияние высокотемпературной диффузии марганца в кристаллический кремний (КДБ-3), легированный бором и содержащий кислород. С помощью рентгеновского дифракционного анализа (XRD) были определены фазовые превращения и структурные изменения в образце КДБ-3 при температурах 1125–1200 °C. Установлено, что при этих условиях формируются силициды марганца (Mn_5Si_3), а также значительное количество аморфной фазы (76,41 %). Бор в основном сохраняется в виде SiB_6 , влияя на термическую стабильность материала, тогда как кислород способствует локальной аморфизации и образованию дефектов (рис.1,2,3). Анализ комбинационного рассеяния образца выявил смещение основного пика кристаллического кремния с 520 см^{-1} до 518 см^{-1} , что является индикатором нарушения дальнего порядка. Помимо этого, в области 570 – 600 см^{-1} наблюдаются дополнительные полосы, которые интерпретируются как проявление локализованных плазмонных резонансов (LSPR), ассоциированных с нанокластерами марганца. Спектры импеданса модифицированных образцов кремния КДБ-3 демонстрируют типичный дугообразный характер на диаграммах Найквиста (рис. 4), а также наличие выраженного фазового сдвига в диапазоне частот 40–70 кГц. Такие особенности интерпретируются как проявление локализованного плазмонного отклика (LSPR), индуцированного наноразмерными агрегатами марганца и изменением электронной проводимости вблизи границ нанофаз. Анализ структурных пор и BET/DFT анализ показал наличие развитой мезопористой структуры с преобладающим диаметром пор в диапазоне 2–5 нм. Общая удельная площадь поверхности по методу BET достигает $23\text{ м}^2/\text{г}$. Микроструктурный анализ поверхности показал наличие развитойnanoструктурной морфологии с выраженной шероховатостью. Энергодисперсионный анализ (EDS) подтвердил присутствие элементов Si, Mn, а также незначительных количеств кислорода, углерода и следов железа. Электрофизические параметры образца до и после диффузии марганца

показывает рост удельного сопротивления более чем на порядок, снижение подвижности носителей и уменьшение концентрации свободных зарядов, что связано с образованием дефектных комплексов и фаз, блокирующих перенос заряда.

Таким образом проведённое комплексное исследование показало, что высокотемпературная диффузия марганца в кремний KDB-3 приводит к глубокой перестройке его кристаллической, морфологической и электронной структуры. Выявлено образование фаз SiB_6 и Mn_5Si_3 , значительное снижение степени кристалличности и увеличение доли аморфной составляющей. Результаты Раман-спектроскопии и импедансного анализа свидетельствуют о наличии локализованных плазмонных резонансов (LSPR), что может быть обусловлено формированием нанокластеров марганца и развитием мезопористой архитектуры. Импедансные характеристики демонстрируют резонансный отклик в диапазоне 40–70 кГц, а BET/DFT-анализ подтверждает наличие развитой системы мезопор с площадью поверхности до $23 \text{ m}^2/\text{г}$. Электрофизические измерения фиксируют рост сопротивления, снижение подвижности и концентрации носителей заряда, что интерпретируется как результат формирования ловушек и дефектных комплексов. Модифицированный кремний КДБ-3 с внедрённым марганцем демонстрирует совокупность свойств, обеспечивающих его перспективность в качестве материала для сенсорных устройств, плазмонной фотоники и спинtronики [1-3]. В будущем планируется расширение температурных режимов и спектроскопических методик для уточнения природы наблюдаемых плазмонных проявлений. Также были проанализированы структурные, электрические и механические свойства модифицированного кремния и рассмотрены механизмы изменения его проводимости. Полученные результаты могут быть полезны для разработки новых полупроводниковых и функциональных материалов, устойчивых к высоким температурам. Температурно-зависимая мультидуговая структура отражает активацию различных релаксационных процессов, а деформация дуг может быть связана с влиянием локализованных плазмонных состояний (рис. 4).



Рис. 1, 2. Элементный состав образца КДБ-3 (EDS).

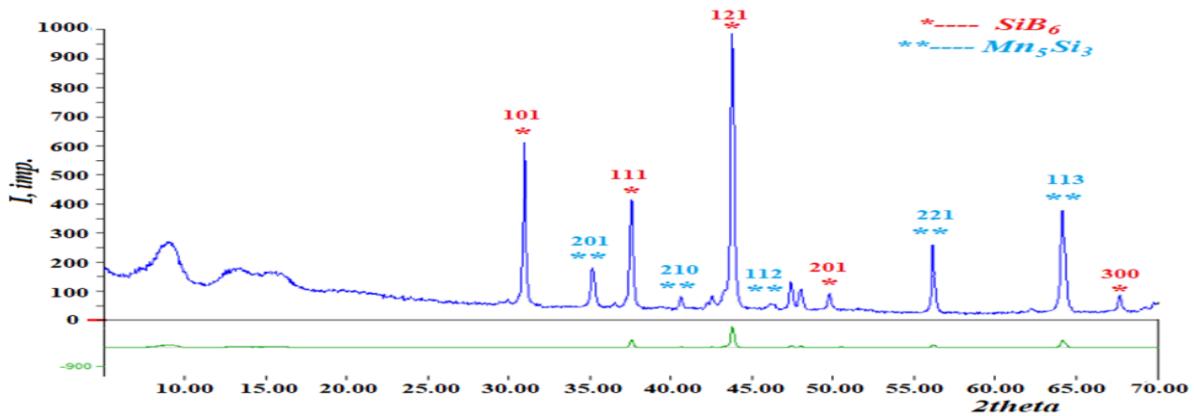


Рис. 3. Рентгенограмма образца КДБ-3: идентификация фаз SiB₆ (87,3 %) и Mn₅Si₃ (12,7 %).

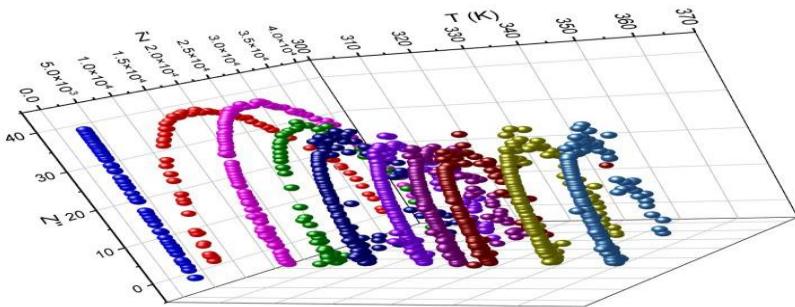


Рис. 4. Трёхмерная Найквист-диаграмма импеданса в координатах Z' – N – T для образца КДБ-3, где N — порядковый номер частотной точки.

Список литературы

- [1] Х.М. Илиев, С.Б. Исамов, Г.Х. Мавлонов, Й.А. Абдуганиев, С.О. Сайдов, М. Шарифова. Особенности фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца. Международная научно-практическая конференция на тему «Актуальные проблемы когерентной оптики и лазерной физики. Сборник докладов. Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова. Ташкент. 6-7 ноября, 2024 г. С. 196-201.
- [2] Абдурахманов К.П, Лебедев А.А, Крейслер Й, Утамурадова Ш.Б. Глубокие уровни в кремнии связанные с марганцем // ФТП 1985.– Т. 19. В. 2.– С. 213-216.
- [3] Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Турсунов М.О., Исамов С.Б., Ковешников С.В., М. Х. Маджитов М.Х. Электрические свойства кремния, легированного марганцем методом высокотемпературной диффузии // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 7. С. 685-692.