

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

САИДОВ САФО ОЛИМОВИЧ<sup>1</sup>, КОСИМОВ ИСРОИЛ ОДИНАЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, КАФЕДРА  
ФИЗИКИ, БУХАРА, РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН

<sup>2</sup>ИНСТИТУТ БИООРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА  
А.С. САДЫКОВА АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН,  
ТАШКЕНТ, РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН

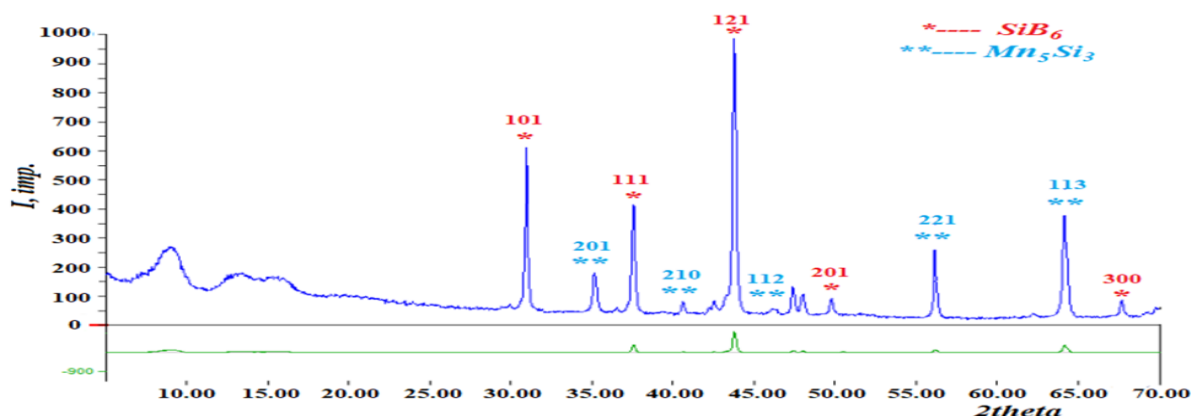
В данной работе исследуется влияние высокотемпературной диффузии марганца в кристаллический кремний (КДБ-3), легированный бором и содержащий кислород. С помощью рентгеновского дифракционного анализа (XRD) были определены фазовые превращения и структурные изменения в образце КДБ-3 при температурах 1125–1200 °С. 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  $520\text{ см}^{-1}$  до  $518\text{ см}^{-1}$ , что является индикатором нарушения дальнего порядка. Помимо этого, в области  $570\text{--}600\text{ см}^{-1}$  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 развитой наноструктурной 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.

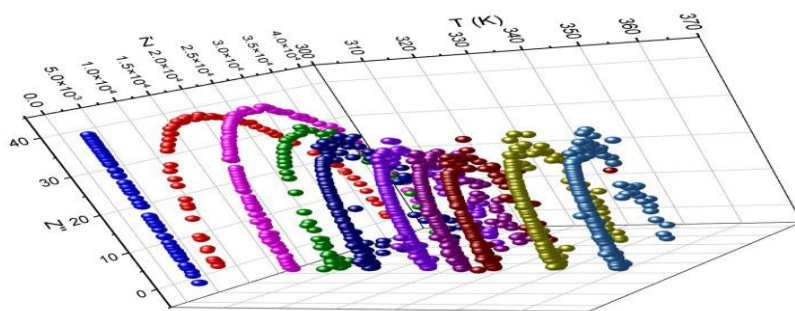
Таким образом проведённое комплексное исследование показало, что высокотемпературная диффузия марганца в кремний КДБ-3 приводит к глубокой перестройке его кристаллической, морфологической и электронной структуры. Выявлено образование фаз  $\text{SiB}_6$  и  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$ , значительное снижение 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 м<sup>2</sup>/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 спинтроники [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  $\text{SiB}_6$  (87,3 %) и  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$  (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. Саидов, 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 ноябрь, 2024 г. С. 196-201.
- [2] Абдурахманов К.П, Лебедев А.А, Крейсль 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 // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 7. С. 685-692.