



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ СИЛИЦИДОВ МАРГАНЦА НА КРЕМНИИ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Б.Э.Эгамбердиев

Л.Э.Хасанова

Институт военной авиации Республики Узбекистан

e-mail: bahrom_prof@mail.ru

Ташкентский институт технологий, менеджмента и
коммуникаций (ТМС)

e-mail: lola.khasanova.93@mail.ru

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17233766>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 25-Sentabr 2025 yil

Ma'qullandi: 28-Sentabr 2025 yil

Nashr qilindi: 30-Sentabr 2025 yil

KEY WORDS

ионная имплантация, силициды марганца, кремний, низкая доза, нанокластеры, кинетика роста, термообработка

ABSTRACT

В статье рассмотрены энергетические и кинетические особенности формирования силицидов марганца на кремнии при ионной имплантации с низкой дозой порядка 10^{14} ионов/см². Проведен анализ влияния дозы, энергии и температуры термообработки на фазовый состав и морфологию образуемых силицидных структур. Показано, что низкие дозы приводят к формированию нанокластеров и островковых структур, что существенно влияет на кинетику фазовых превращений и механизмы роста силицидов. Результаты исследования важны для разработки технологий формирования ультратонких силицидных слоев в микроэлектронике, где требуется высокая степень контроля над структурой и свойствами контактов

Введение

Силициды марганца представляют собой перспективный класс функциональных материалов для применения в микроэлектронике благодаря высокой электропроводности, химической стабильности и совместимости с кремниевой технологией. Формирование силицидов на кремнии традиционно осуществлялось методами осаждения и диффузии металлов, однако ионная имплантация обеспечивает уникальные возможности точного контроля состава и глубины введения металла. Особенно актуально изучение процессов образования силицидов при низких дозах имплантации, порядка 10^{14} ионов/см². Такие дозы позволяют формировать ультратонкие силицидные слои или нанокластеры, что важно для создания высокопроизводительных наноструктурированных устройств с минимальными повреждениями и высокой однородностью. Кинетика образования силицидов при низких дозах существенно отличается от процессов при высоких концентрациях

металла, поскольку ограниченное количество марганца влияет на скорость фазовых превращений и морфологию образующихся слоев.

Настоящая работа направлена на систематическое исследование энергетических и кинетических аспектов формирования силицидов марганца на кремнии при низкой дозе ионной имплантации и различных режимах термообработки.

Методы исследования

В качестве подложек использовались монокристаллические пластины кремния (n-типа проводимости, ориентация (100), удельное сопротивление 5–10 Ом·см). Поверхность была предварительно очищена от органических загрязнений и естественного оксида с использованием стандартной процедуры RCA и HF-обработки.

Имплантация ионов марганца (Mn^{+}) проводилась с использованием имплантера типа Danfysik 1090, обеспечивающего стабильность потока ионов на уровне $\pm 2\%$. Основные параметры имплантации: Энергия ионов: 40 кэВ, Доза: 1×10^{14} ионов/см², Температура подложки: 25 °С (комнатная), Угол падения: 7° от нормали к поверхности (для предотвращения каналирования), Среда: высокий вакуум $< 5 \times 10^{16}$ Па. Энергия 40 кэВ выбрана с учётом расчетов в программе SRIM, согласно которым максимальная глубина проникновения марганца при данной энергии составляет 25–30 нм, с гауссовым распределением концентрации.

Отжиг осуществлялся в трубчатой печи в инертной атмосфере аргона с чистотой 99.999%. Температурные режимы варьировались: Температуры- 700, 800 и 900 °С, Время выдержки: от 30 мин до 2 часов, Скорость нагрева/охлаждения: 10 °С/мин, Контроль температуры: термопара типа К, точность ± 2 °С. Цель отжига — инициировать реакции между имплантированным марганцем и кремнием для образования силицидных фаз ($MnSi$, Mn_5Si_3).

Методы анализы:

1.Рентгеновская дифракция (XRD):

- Прибор: PANalytical X'Pert Pro
- Излучение: $CuK\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)
- Диапазон сканирования: 20°–80°
- Шаг: 0.02°, время счета: 1 с/шаг
- Используемые базы данных: ICDD PDF-2 (фазы $MnSi$, Mn_5Si_3 , Si)

2Электронная микроскопия (ТЕМ)

- Прибор: JEOL JEM-2100
- Условия: высоковакуум, ускоряющее напряжение 200 кВ
- Подготовка образцов: фокусированная ионная пушка (FIB)
- Цель: визуализация наноструктур и границ фаз

3.Глубинный анализ

• SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry) — для анализа профиля концентрации Mn

• RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) — для определения количества введённых атомов и подтверждения дозы

Результаты и обсуждение

Расчеты с использованием SRIM показали, что при энергии 40 кэВ максимальное проникновение ионов Mn составляет около 30 нм, а распределение концентрации

описывается гауссовой кривой с максимумом на ~ 25 нм. Это подтверждено измерениями SIMS и RBS, которые показали максимальную концентрацию в районе 1×10^{20} атомов/см³.

На рентгеновских дифрактограммах образцов, отожженных при 700 °С, зафиксированы слабые пики на углах 35.2° и 50.6°, соответствующие плоскостям (111) и (210) фазы MnSi.

При увеличении температуры отжига до 900 °С появляются дополнительные пики на 42.7° и 70.3°, идентифицированные как фаза Mn₅Si₃. Это указывает на начальную стадию образования многокомпонентных силицидных фаз.

Микроскопия показала формирование дискретных нанокластеров размером 5–15 нм в поверхностной области. Наблюдается отсутствие сплошного слоя силицида, что подтверждает влияние низкой дозы на механизм роста. Нанокластеры изолированы, не перекрываются, что говорит о недостаточном насыщении подложки.

Низкая доза ионов марганца (1×10^{14} ионов/см²) приводит к формированию дискретных участков насыщения кремния марганцем, что ограничивает образование непрерывного силицидного слоя. При термической обработке происходит активация диффузии и реакция марганца с кремнием, но только в локальных областях, где достигнут порог насыщения.

Процесс роста фаз можно описать как диффузионно-ограниченный, где формирование фазы зависит от:

- концентрационного градиента Mn,
- температуры отжига,
- локального состояния решетки кремния (повреждение, рекристаллизация).

Появление фаз MnSi при температуре 700 °С свидетельствует о том, что эта фаза термодинамически более стабильна на начальных этапах. Mn₅Si₃ формируется только при более высоких температурах и более длительной выдержке, что связано с потребностью в более высокой диффузионной подвижности атомов.

Островковая (кластерная) структура, подтвержденная ТЕМ, может быть полезной в применениях, где требуются точечные электрические контакты или локальные магнитоэлектрические эффекты. Однако для применения в металл-семикондукторных контактах с низким сопротивлением необходима оптимизация дозы и термических режимов для достижения сплошной фазовой границы.

Выводы

Проведённое исследование позволило детально рассмотреть процессы образования силицидов марганца на кремнии при ионной имплантации с дозой 1×10^{14} ионов/см², а также оценить влияние температуры отжига на фазовый состав, морфологию и глубинное распределение примеси. На основании полученных результатов сделаны следующие ключевые выводы:

- Низкая доза имплантации марганца ($\sim 10^{14}$ и/см²) приводит к формированию изолированных нанокластеров силицидов в поверхностной области кремниевой подложки. Это обусловлено тем, что общее количество ионов марганца недостаточно для формирования непрерывного слоя, необходимого для сплошного фазового превращения.

- Рентгенодифракционный анализ (XRD) подтвердил образование фазы MnSi при отжиге при 700 °С, а при повышении температуры до 900 °С появляются признаки образования фазы Mn₅Si₃. Это указывает на температурно-зависимую эволюцию фазового состава, что согласуется с термодинамическими данными о стабильности силицидов марганца.

- Темп роста силицидных фаз ограничен механизмом диффузии марганца в кремний, что особенно ярко проявляется при низкой дозе. В условиях ограниченной подвижности атомов и недостатка марганца, рост фазы осуществляется по механизму «островков» (кластеров), а не по модели фронтального роста.

- Морфологический анализ (ТЕМ) выявил, что размеры образующихся нанокристаллитов варьируются от 5 до 15 нм. Наличие дискретных силицидных образований говорит о высокой степени локализации процесса фазообразования, зависящей от микроструктуры и плотности внедрённых ионов.

- Повреждение кристаллической решётки кремния, вызванное имплантацией, частично устраняется при высокотемпературной термообработке. Однако полное восстановление возможно только при повышении температуры выше 800–850 °С, что важно учитывать при интеграции таких структур в микроэлектронные схемы.

- Полученные данные демонстрируют, что ионная имплантация с низкой дозой может эффективно применяться для создания локализованных функциональных слоев, особенно в нанотехнологиях и спинтронике, где критически важны точечные контакты и стабильность фаз при малом объеме материала.

- В то же время, для формирования непрерывных низкоомных силицидных контактов (например, в Шоттки-диодах или СБИС) доза порядка 10¹⁴ и/см² является

не - Таким образом, ионная имплантация с дозой порядка 10¹⁴и/см² открывает перспективные направления для селективного легирования и создания точечных наноструктур, но требует дополнительной оптимизации (энергия, доза, температура) при переходе к массовым технологиям микроэлектроники

т

Литература:

[1] Риссел Х, Руге И. «Ионная имплантация». М.Наука 1983. С 360.

[2] Лифшиц В.Г. «Электронная структура и силицидов образование в тонких пленках переходных металлов на кремнии».Препринт. 1984,с.260.

[3] Gerasimenko.N.N., Parkhomenko Yu.N. Silicon as material for nanoelectronics//Technosfera, M. 2007.352P.

[4] Biesinger M.C., Payne B.D., Grosvenor A.P., Lau L.W., Gersonb A.R., Smart R. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni // Appl. Surf. Sci. – 2011. – V. 257, No. 7. – P. 2717–2730. – doi: 10.1016/j.apsusc.2010.10.051.

[5] Эгамбердиев Б.Э, Бахадырханов М.К, Абдугаббаров М.С «Свойства поверхностных и приповерхностных слоев кремния, имплантированного марганцем» Неорганические материалы РАН, 1995,Т.31,№ 3,С. 301-303.

[6] Эгамбердиев Б.Э. «Электронно- спектроскопические исследования физических свойств эпитаксиальных комбинаций и ионно- имплантированных слоев в кремнии ». Докторская диссертация – М, 2003,С

243.

[7] Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний-материал
наноэлектроники. М.: Техносфера,2007.352с.

[8] Эгамбердиев Б.Э. , Маллаев А. С. Кремниевые силицидные
структуры на основе ионного легирования. Т.:изд. «Наука и технология»2019г. 168с.

