

УДК 537.534.8

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ СИЛИЦИДОВ
МАРГАНЦА НА КРЕМНИИ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**<https://doi.org/10.5281/zenodo.18992948>**Б.Э.Эгамбердиев¹****Л.Э.Хасанова²**¹ Институт военной авиации Республики Узбекистан

e-mail: bahrom_prof@mail.ru

² Ташкентский институт технологий, менеджмента и коммуникаций (TMC)e-mail: lola.khasanova.93@mail.ru

Аннотация: 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.

Ключевые слова: ионная имплантация, силициды марганца, кремний, низкая доза, нанокластеры, кинетика роста, термообработка.

Abstract: This article investigates the energetic and kinetic features of manganese silicide formation on silicon during ion implantation at a low dose of approximately 10^{14} ions/cm². The influence of implantation dose, energy, and annealing temperature on the phase composition and morphology of the resulting silicide structures is analyzed. It is shown that low doses lead to the formation of nanoclusters and island-like structures, which significantly affect the kinetics of phase transformations and silicide growth mechanisms. The results of this study are important for the development of technologies aimed at forming ultrathin silicide layers in microelectronics, where precise control over the structure and properties of contacts is required.

Keywords: ion implantation, manganese silicides, silicon, low dose, nanoclusters, growth kinetics, annealing.

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 $< 5 \times 10^{-6}$ 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, Mn₅Si₃).

Методы анализа:

1. Рентгеновская дифракция (XRD):
 - Прибор: PANalytical X'Pert Pro

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

2. Электронная микроскопия (TEM)

- 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 введенных 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°C , зафиксированы слабые пики на углах 35.2° и 50.6° , соответствующие плоскостям (111) и (210) фазы MnSi.

При увеличении температуры отжига до 900°C появляются дополнительные пики на 42.7° и 70.3° , идентифицированные как фаза Mn_5Si_3 . 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°C свидетельствует о том, что эта фаза термодинамически более стабильна на начальных этапах. Mn_5Si_3 формируется только при более высоких температурах и более длительной выдержке, что связано с потребностью в более высокой диффузионной подвижности атомов.

Островковая (кластерная) структура, подтверждённая 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/ cm^2 , 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/ cm^2) 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°C , а при повышении температуры до 900°C появляются признаки образования фазы Mn_5Si_3 . 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 $800\text{--}850^\circ\text{C}$, 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 10^{14} и/см² является недостаточной. Требуется её увеличение до 10^{15} - 10^{16} и/см², либо повторная имплантация/легирование.

- Таким образом, ионная имплантация с дозой порядка 10^{14} и/см² открывает **перспективные направления для селективного легирования и создания точечных наноструктур**, но требует дополнительной оптимизации (энергия, доза, температура) при переходе к массовым технологиям микроэлектроники.

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, М. 2007.352Р.
- [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.

Таблица 1. Основные параметры ионной имплантации марганца в кремний

Параметр	Значение
Энергия ионов Mn ⁺	40 кэВ
Доза	1×10^{14} ионов/см ²
Угол имплантации	7°

Температура	комнатная
Глубина проникновения	~30 нм (по SRIM)

Таблица 2. Влияние температуры отжига на фазовый состав силицидов

Температура (°C)	Образующиеся фазы	Особенности
700	MnSi	Формирование базовой фазы
800	MnSi + частично Mn ₅ Si ₃	Начало образования высокотемпературной фазы
900	Mn ₅ Si ₃ , MnSi	Явное присутствие Mn ₅ Si ₃ , увеличение размера кластеров

Таблица 3. Сравнение морфологии силицидов при низкой и высокой дозах

Параметр	Низкая доза (10 ¹⁴)	Высокая доза (10 ¹⁶)
Морфология	нанокластеры	Сплошной слой
Размер частиц	5-15 нм	30–50 нм
Фазовый состав	MnSi, Mn ₅ Si ₃ (частично)	Mn ₅ Si ₃ , MnSi, Mn ₃ Si
Контактное сопротивление	Повышенное	Низкое

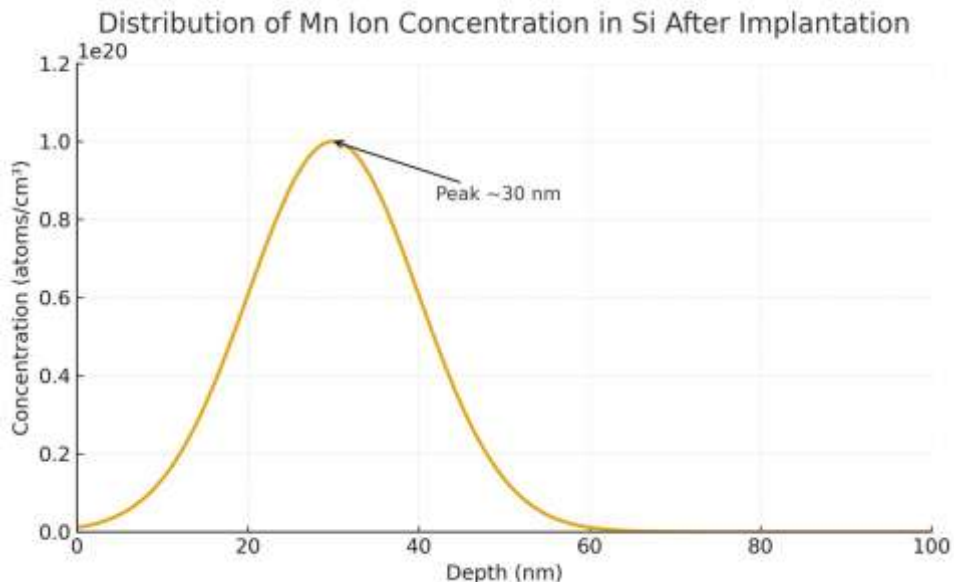


Рис.1 График распределения ионов марганца .

Гауссово распределение концентрации ионов марганца, имплантированных в кремний при энергии 40 кэВ и дозе 1×10^{14} ионов/см². Ось X подписана как «Глубина (нм)» и варьируется от 0 до 100 нм. Ось Y подписана как «Концентрация (атомов/см³)» и варьируется от 0 до значения пика.

Плавная колоколообразная кривая с максимумом концентрации примерно на глубине 30 нм.

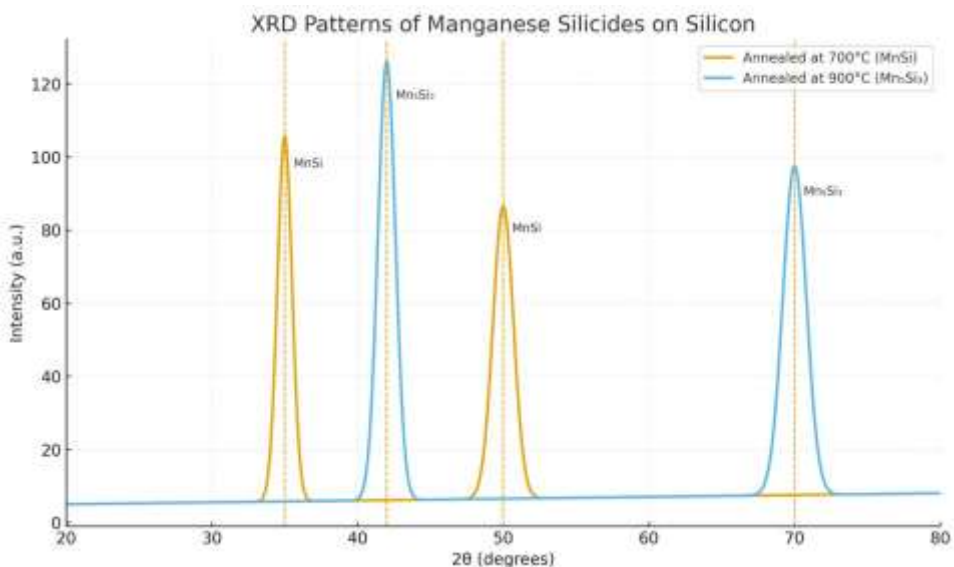


Рис.2 Дифракционная картина (XRD)

Научные рентгенодифракционные (XRD) спектры тонких пленок силицидов марганца, сформированных на кремнии после отжига. Показаны два спектра: — один после отжига при **700 °C** с пиками MnSi около **35°** и **50°**,

– второй – после отжига при **900 °C** с пиками Mn_5Si_3 около **42°** и **70°**.
Ось Y – **интенсивность**, ось X – **угол 2-тета (2θ)**.
Пики чётко обозначены.

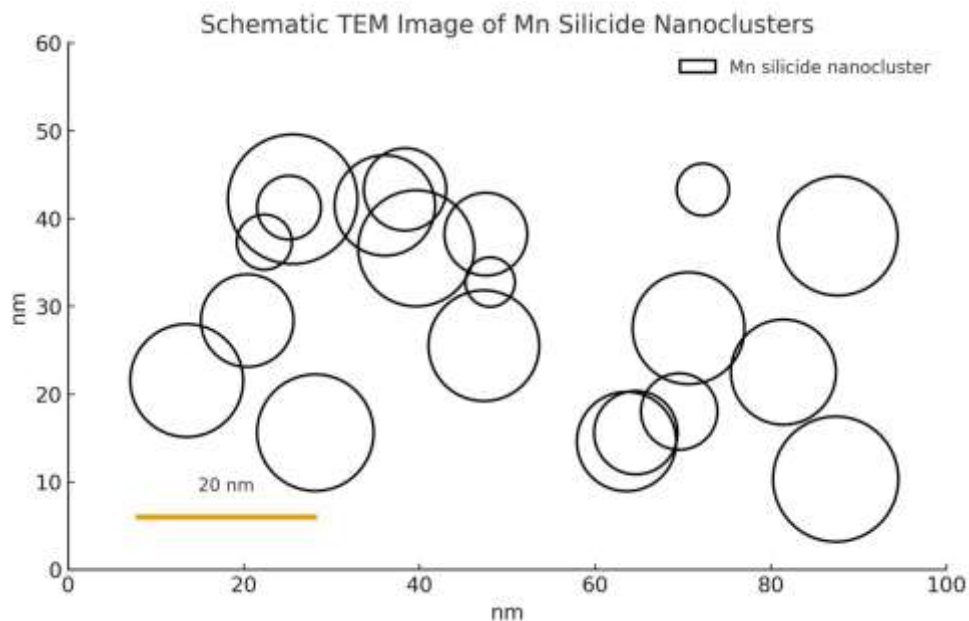


Рис.3 Схематическое ТЕМ-изображение нанокластеров

Схематическое изображение в стиле просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, ТЕМ), показывающее нанокластеры силицида марганца на кремниевой подложке после низкодозной ионной имплантации. Нанокластеры размером от 5 до 15 нм, неравномерно распределены по гладкой поверхности кремния.