

Амин МАЛЛАЕВ,

Директор Национального центра подготовки педагогов новых методов Кашкадарьинской области, доцент.

E-mail: mallayev1964@mail.ru

Бахром ЭГАМБЕРДИЕВ,

Профессор Федерального государственного бюджетного высшего образовательного учреждения Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Ташкенте

E-mail: bahrom_prof@mail.ru

Шохрух САЙФУЛЛОЕВ,

Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, PhD

E-mail: sayfulloev92@mail.ru

НИИ физики полупроводников и микроэлектроники УЗМУ, Под редакцией с.н.с., Ж.Ж.Хамдамов.

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ КОБАЛЬТА

Аннотация

Приводятся результаты исследования профилей распределения имплантированных атомов кобальта в кремнии в зависимости от дозы облучения и температуры отжига методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Полученные результаты хорошо согласуются с аналогичными данными полученными методами вторично-ионной масс спектроскопии (ВИМС). Изучены влияния термического отжига на распределения кобальта и в частности кислорода. Доказано, что при определенных условиях термической обработки и дозах облучения на поверхности монокристалла образуются так называемые эпитаксиальные силициды, которые могут играть роль проводящих слоев или металлических покрытий. Отмечена возможность использования метода РОР для анализа как концентрационного распределения легирующих примесей, так и взаимодействия примесей.

Ключевые слова: имплантация, кобальт, эпитаксиальный слой, термический отжиг, профиль распределения, доза облучения, резерфордовское обратное рассеяние, вторично-ионная масс спектроскопия.

EFFECT OF ANNEALING ON THE CRYSTAL STRUCTURE OF THE SURFACE OF SILICON DOPED WITH COBALT IONS

Annotation

The paper reports results of the study of the distribution profiles of implanted iron and cobalt atoms in silicon as a function of the radiation dose and annealing temperature that was performed by applying the Rutherford backscattering spectroscopy (RBS). The effects of thermal annealing on the distribution of iron, cobalt, and in particular oxygen were studied. The authors strongly suggest that under certain heat treatment conditions and by applying specific radiation doses, the so-called epitaxial silicides will build on the surface of a single crystal, which can play the role of conducting or metal layers. One could consider the RBS method for analysis of both the topological distribution of dopants and the interaction of impurities.

Key words: impurities, profiles, influence, thermal annealing, implanted atoms, thin layers, depth, radiation doses.

KOBALT IONLARI BILAN ION IMPLANTATSIYALANGAN KREMNIY SIRTINING KRISTAL TUZILISHIGA TOBLASHNING TA'SIRI

Аннотация

Мақоллада кремнийда имплантация қилган темир ва кобальт атомларининг тарқалиш профилларини радиация дозаси ва тавланish haroratiga qarab o'rganish natijalari haqida ma'lumot berilgan, bu esa Ruterford qaytaruvchi spektroskopiya (RBS) yordamida amalga oshiriladi. Termik tavlanişning teмир, kobalt va ayniqsa kislorodning tarqalishiga ta'siri o'rganildi. Mualliflar ma'lum issiqlik bilan ishlov berish sharoitida va ma'lum nurlanish dozalarini qo'llash orqali epitaksial silitsidlar deb ataladigan yagona kristall yuzasida o'tkazuvchan yoki metall qatlamlar rolini o'ynashi mumkinligini qat'iy tavsiya qiladi. Dopantlarning topologik taqsimotini va aralashmalarning o'zaro ta'sirini tahlil qilish uchun RBS usulini ko'rib chiqish mumkin.

Калит so'zlar: Kirishmalar, profillar, ta'sir, termik toblanish, implantatsiya qilingan atomlar, yupqa qatlamlar, chuqurlik, nurlanish dozalari.

Введение. Для совершенствования кремниевой технологии в микроэлектронике весьма важным является развитие исследований в области двумерного и трехмерного построения интегральных схем (ИС), направленных на повышение быстродействия полупроводниковых приборов при уменьшении размеров активных элементов, улучшения характеристик контактов и локальных межсоединений.

Научная актуальность проблемы исследования процесса дефектообразования скрытых слоев переходных металлов, полученных ионным легированием в кремниевых подложках, определяется необходимостью более глубокого понимания основных процессов, происходящих во время формирования этих структур. С практической точки зрения эти исследования актуальны, прежде всего, в связи с возможностью формирования гетероструктур Si/CoSi₂/Si, пригодных для применения в качестве локальных контактов и межсоединений в трехмерных системах металлизации, а также в качестве современных быстродействующих приборов, таких как, например, транзисторы с «проницаемой» или металлической базой.

Возможность детального исследования системы Si-CoSi₂ может служить моделью для изучения дефектообразования других переходных металлов в кремнии, а также для исследования границы раздела фаз силицид металла/кремний, в связи с ее достаточно простым способом получения и изучения.

Методы исследования. Имплантация кремния ионами кобальта использовалась для создания силицидов металлов [1–3]. Композиционные материалы на основе магнитных нанокластеров находят применение при разработке новых элементов хранения информации [4]. Силициды металлов используются также в качестве материалов для контактов и межсоединений элементов интегральных микросхем.

Ионная имплантация в зависимости от дозы и энергии облучения приводит к существенному изменению состава, структуры и свойств полупроводниковых материалов. В этом отношении монокристаллы кремния, легированные ионами Co с энергией $E=20\div 50$ кэВ представляют особый интерес, так как при низких дозах облучения ($D\leq 10^{15}$ ион/см²) могут создавать электроактивные центры с большой концентрацией, которые невозможно получить методом термодиффузии, при высоких дозах ионов образуются силициды металлов с новыми физическими свойствами. В частности, пленки силицидов $CoSi_2$ имеют кубическую решетку и обладают очень маленькими удельными сопротивлениями ($\rho\approx 30\div 50$ мкОм·см), вследствие чего являются весьма перспективными в создании СВЧ-транзисторов с металлической и проницаемой базой. Однако, такие пленки в настоящее время получают методами молекулярно лучевой эпитаксия (МЛЭ) и твердофазного эпитаксия (ТФЭ). Подробное описание установки МЛЭ и методов очистки содержится в работе [5]. Получение скрытых проводящих пленок силицидов Co методом ионной-имплантации и исследования их физико-химических, электрофизических и структурных свойств пока ещё находятся в стадии развития.

Были проведены экспериментальные исследования концентрационных профилей распределения атомов кобальта, имплантированных в кремний с энергией $E_0=40$ кэВ с вариацией дозы облучения в интервале $10^{15}\div 10^{17}$ ион/см². В качестве исходного материала использован кремний марки КДБ с удельным сопротивлением $\rho=10$ Ом·см., исследования проводились использованием методов вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), дифракция быстрых электронов на отражение (ДБЭ), Резерфордского обратного рассеяния (РОР).

Имплантацию ионов кобальта в кремний осуществляли на установке ИЛУ-3 при энергии ионов 40 кэВ вдоль кристаллографической оси (100, 111) при постоянной плотности ионного тока, равной 50 мкА/см². Профиль распределения кобальта в кремнии измеряли на вторично-ионной масс-спектрометрической установке LAS-2200 фирмы "Riber" и на установке, описанной в удельное сопротивление образцов измеряли четырех зондовым методом.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2. представлены спектры обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 40 кэВ от монокристалла Si (111), имплантированного ионами Co^+ с дозой $10^{15}\div 10^{17}$ ион/см². Проведены исследования образцов кремния имплантированных ионами кобальта при различных условиях (различные дозы), как непосредственно после имплантации, так и после проведенной термообработки. Результаты эксперимента в виде спектров РОР, представлены ниже. Видно, что пик характерный для Co начинает появляться при дозе $D\approx 10^{15}$ ион/см², что кобальт заглублен, максимум распределения находится примерно на расстоянии 120 нм, что не плохо согласуется с данными полученными с помощью ВИМС.

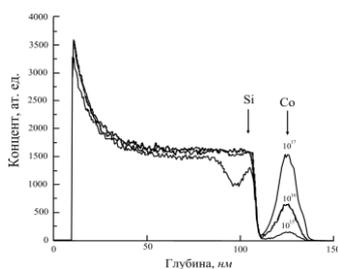


Рис. 2. Спектры РОР ионов He^+ на монокристалле Si, легированного ионами Co с энергии 40 кэВ с дозами облучения $10^{15}\div 10^{17}$ ион/см².

Установлено, что с ростом дозы увеличивается пик соответствующий рассеянию ионов гелия на кобальте, а также изменение формы спектра (уменьшение выхода рассеяния на матрице) на глубине залегания примеси. После термического отжига $1000^{\circ}C$ в течение 30 мин. профиль распределение кобальта заметно сужается и концентрация в центре распределения увеличивается. При этом концентрация кобальта в области широкого максимума составляла $30\div 35$ ат %. В этих слоях преимущественно образовывались соединения типа $CoSi_2$. Одновременно, резкое понижение спектра для кремния указывает на заметный отжиг радиационных дефектов в кремнии. На всех спектрах после отжига на спектре кремния видны маленькие пики - это кислород. По всей видимости, при термической обработке был недостаточно хороший вакуум, вследствие чего на образцах появилась окись кремния SiO_2 .

На рис. 3 показаны профили распределения для тока 50 мкА, которого, как мы видели из экспериментальных спектров достаточно для процесса самоотжига. Здесь же показаны профили для того же образца, но после отжига с температурой $1000^{\circ}C$. Очень хорошо видно, что образовался слой дисилицида кобальта.

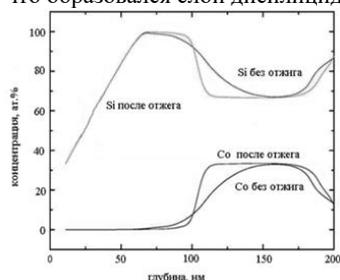


Рис. 3. Профили распределения Co в Si с энергией 40 кэВ и дозой 10^{17} ион/см² до и после отжига.

Иная картина наблюдается на рис.4. представлены спектры обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 40 кэВ от монокристалла Si (111), имплантированного ионами Co^+ с дозой $1\cdot 10^{17}$ ион/см². Видно, что пик характерной для Co начинает появляться при дозе $D\approx 10^{15}$ ион/см². Одновременно исследовались кристаллическая структура поверхности и электрофизические свойства ионно-легированных слоев.

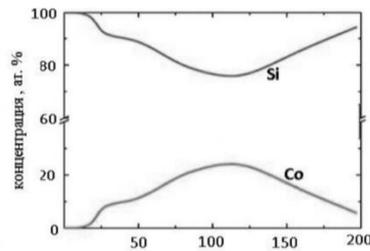


Рис. 4. Профили распределения Co в Si с энергией 40 кэВ и дозой 10^{17} ион/см².

Видно, что кобальт заглоблен, максимум распределения находится примерно на расстоянии 120 нм, что не плохо согласуется с данными полученными с помощью ВИМС. Видно, тоже, что дозы и плотности тока еще не достаточно для образования CoSi₂.

Одновременно исследовались кристаллическая структура поверхности и электрофизические свойства ионно-легированных слоев. На рис.5 представлены электронные картины, полученные от поверхности Si до и после ионного легирования, а также после термической обработки при разных температурах.

Как видно из рисунка, в случае чистого кремния электронная картина имеет сплошной и равномерный вид, так как образцы были шлифованы и полированы (рис.5.а). После ионного легирования в зависимости от дозы облучения и типа ионов электронная картина существенно меняется. Вид картины от гладкой поверхности переходит к картине шероховатой или матовой (рис.5.б.).

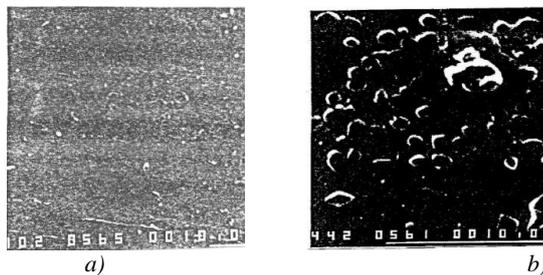


Рис. 5. Электронно – микроскопическая картина поверхности чистого кремния (а) и поверхности ионно-легированной Co⁺ (б).

Температурный отжиг сильно влияет на состояние имплантированных образцов. При малых значениях дозы облучения и термическом отжиге, в случае Co до 800⁰С существенных изменений электронной картины не происходит. При температуре 800⁰С и выше на картине наблюдаются некоторые окантованные области, характерные для монокристаллов.

Результаты этих экспериментов доказывают, что сложные поверхностные процессы зависят от температуры и дозы легирующих примесей [3-4]. Совершенно иные результаты получаются при легировании кремниевых образцов большими дозами [5-6]. На рис.6 представлены электронные картины поверхности кремния, легированного ионами Co с дозой 10^{17} ион/см² после отжига при температуре 950⁰С. Как видно из рисунка, окантованные области как бы слились, образуя сплошной слой в виде монокристалла с большим количеством дефектов.

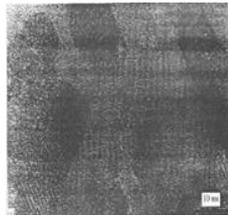


Рис. 6. Микрофотография поверхности кремния, легированного ионами Co⁺ с дозой 10^{17} ион/см² после термического отжига при 950⁰С.

Дальнейшее повышение температуры отжига до 1100⁰С приводит к существенному изменению состояния поверхности. Электронная картина переходит от “эпитаксиальной” до аморфной поверхности (рис.7).



Рис. 7. Микрофотография поверхности кремния, легированного ионами Co⁺ с дозой 10^{17} ион/см², после термического отжига при температуре 1100⁰С.

Эти изменения относятся не только к структуре, но и к составу поверхности [6-11]. Заметно уменьшаются по амплитуде пики легирующих элементов, что свидетельствует о разложении силицидных слоев и частичному испарению легирующих примесей.

Заключение. Исследования показали, что ионное легирование сильно влияет на структуру поверхности в зависимости от дозы и энергии ионов. После легирования поверхность становится шероховатой. На эту структуру

сильно влияет температурный отжиг. При температуре выше 800°C на поверхности образуются некоторые окантованные области, характерные для монокристалла.

Определены оптимальные условия получения кремния, ионно-имплантированного Co, позволяющие сохранить исходные параметры образцов, как при ионной имплантации, так и при термообработке в интервале температур $300\div 1200^{\circ}\text{C}$. Установлено, что при прогреве образцов, легированных дозой 10^{15} ион/ cm^2 , активация наблюдается при температуре 650°C . В процессе термообработки при $T=750^{\circ}\text{C}$ концентрация электроактивных атомов кобальта в Si увеличивается до $(2-5)\cdot 10^{15}$ cm^{-3} , что в 4-5 раз больше, чем при диффузионном легировании. Увеличение температуры отжига выше 1200°C приводило к резкому уменьшению концентрации электроактивных примесей.

Показано, что изменение полученной дозы меняет глубину залегания и толщину слоев дисилицида кобальта. Варьируя дозу можно изменять глубину залегания и толщину слоя CoSi_2 . Под влиянием высокотемпературного отжига происходит значительное уменьшение выхода альфа-частиц рассеянных на кремнии и кобальте на спектрах каналирования POP, что указывает на то, что большинство радиационных дефектов устраняется и происходит улучшение кристалличности структуры имплантированного слоя.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Goldfarb, CoSi_2 surface phase separation into self-assembled lateral multilayers // *Appl. Phys. Lett.* - 82. - P. 1185-1187. - 2003
2. Эгамбердиев Б.Э., Холлиев Б.Ч., Маллаев А. С., Зоирова М. Э., Эшонхонов А. "Получение пленок CoSi_2/Si (100) и анализ их морфологии и стехиометрии методами молекулярно-лучевой, твердофазной и реактивной эпитаксии" ЭОМ, Молдова, 2007, №1, С.88-92.
3. K. Sakamoto, T. Maeda, and M. Hasegawa. Growth of epitaxial CoSi_2 for contacts of ultra-thin SOI MOSFETs // *Thin Solid Films.* - 369. - 2000. - С.240-243.
4. Эгамбердиев Б.Э., Маллаев А. С. Кремниевые силицидные структуры на основе ионного легирования. Т.: изд. «Наука и технология» 2019г. 168с.
5. Egamberdiev B.E., Holliev B.Ch., Mallaev A.S., Zoirova M.E., Eshonkhonov A., Preparation of CoSi_2/Si (100) films and analysis of their morphology and stoichiometry by molecular beam, solid-state and reactive epitaxy // *EOM, Moldova*, 2007, No. 1, P.88-92.
6. B.E. Egamberdiev, A.T. Rakhmanov, A.S. Mallaev, A.A. Rashidov The electron-spectroscopic Investigations of the epitaxial CoSi_2 films on silicon // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology* 2018, vol.5, Issue 1.p.5050-5053.
7. K. Raian, L.M. Hsiung, J.R. Jimenez, L.J. Schowaller, K.V. Ramanathan, R.D. Thompson, S.S. Iyer. Microstructural stability of epitaxial CoSi_2/Si (001) interfaces. // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. No. 9. P. 4853 - 4856.
8. Rangelov G., Augustin P., Stober J., Th. Fauster. Initial stages of epitaxial CoSi_2 formation on Si(100) surfaces. // *Phys. Rev. B.* 1994. V. 49. No. P. 7535-7542.
9. Karpenko O.P., Yalisove S.M. CoSi_2 heteroepitaxy on patterned Si(100) substrates. // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 80. No. 11. P. 6211 - 6218.
10. Ikegami H., Ikeda H., Zaima S., Yasuda Y.. Thermal stability of ultrathin CoSi_2 films on Si(100)-2x1 surfaces. // *Appl. Surf. Sci.* 1997. V. 117/118. P. 275 - 279.
11. R.T. Tung. A novel technique for ultrathin CoSi_2 layers: oxide mediated epitaxy. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1997. V. 36. Part 1, No. 3b. P. 1650 - 1654.