

## Структура и свойства двухслойной наноразмерной системы $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ , полученной ионной имплантацией

© *Ё.С. Эргашов, Б.Е. Умирзаков*

Ташкентский государственный технический университет,  
100095 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: yergashev@mail.ru

(Поступило в Редакцию 13 января 2018 г.)

С использованием метода ионной имплантации получена двухслойная система типа  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  и определены оптимальные режимы имплантации и отжига для ее формирования. Показано, что такая система формируется, когда разности между высокой и низкой энергией ионов составляет не менее 15–20 keV. Сформированные структуры имели гладкую поверхность с высокой кристалличностью.

DOI: 10.21883/JTF.2018.12.46788.12-18

### Введение

Многослойные тонкопленочные наноструктуры, содержащие слои  $\text{CoSi}_2$ , имеют перспективы в создании металл-диэлектрик-полупроводниковых (МДП)-, полупроводник-диэлектрик-полупроводниковых (ПДП)-структур, омических контактов, барьерных слоев, электронных и магнито-запоминающих устройств [1–3]. Подобные структуры обычно создаются методом молекулярно-лучевой-эпитаксии (МЛЭ). При создании слоев  $\text{CoSi}_2$  основное внимание уделяется уменьшению до минимума поверхностной концентрации кислорода. Наличие кислорода приводит к существенному увеличению сопротивления контакта и уменьшению диффузии атомов Co в Si. Для избавления от кислорода во многих случаях между кремнием и пленкой кобальта создается диффузионный барьер путем нанесения сверхтонких пленок Ti, Ta и W [3,4].

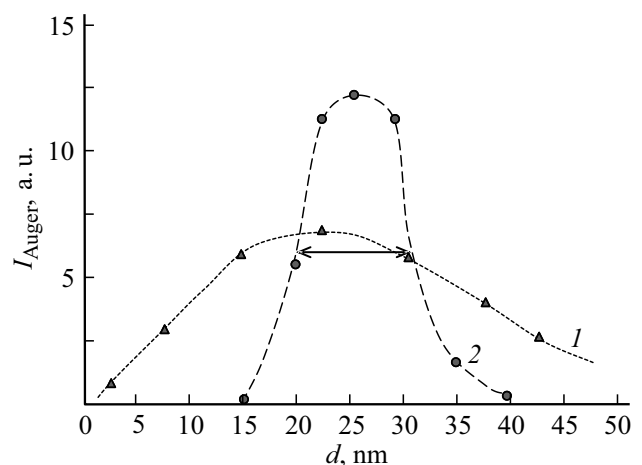
Одним из перспективных методов создания нанопленочных структур на поверхности и приповерхностной области полупроводниковых и диэлектрических пленок является низкоэнергетическая ионная имплантация [5–7]. Ионная имплантация позволяет не только внедрять примеси на необходимые глубины в необходимом количестве, но и приводит к распылению чужеродных примесей (в том числе кислорода) с поверхностной области подложки.

В настоящей работе мы впервые попытались получить двухслойные эпитаксиальные гетероструктуры типа  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  имплантацией ионов  $\text{Co}^+$  в Si.

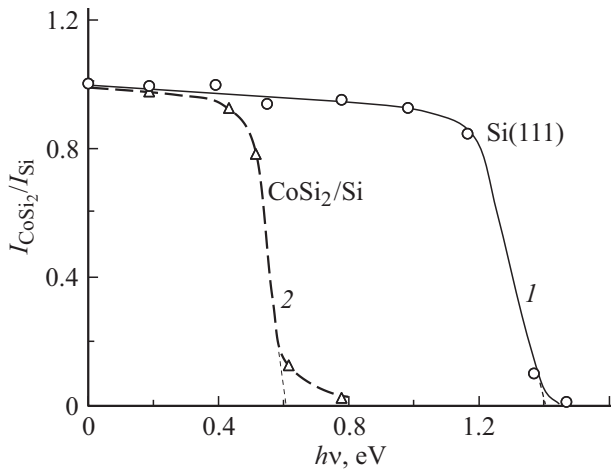
### Методика эксперимента

Объектами исследования являлись монокристаллические пленки  $\text{Si}/\text{CaF}_2$  (111), толщиной  $\sim 100$  нм. Имплантация ионов  $\text{Co}^+$  проводилась поэтапно: сначала с высокой энергией (в интервале  $E_0 = 20\text{--}30$  keV), а затем с низкой энергией ( $E_0 = 1\text{--}3$  keV) при дозе насыщения

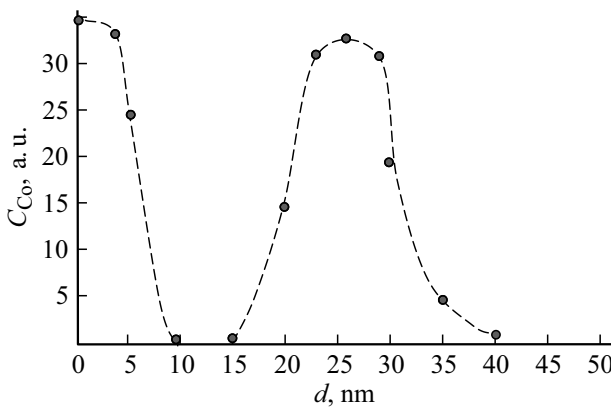
( $D_{\text{sat}} \geq 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ). Перед ионной имплантацией образцы обезгаживались в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-6}$  Па) при  $T \approx 1100$  К. При этом поверхностная концентрация кислорода уменьшается до 0.5 at.%, а углерода — до 1–2 at.%. Исследования проводились с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и измерением зависимости интенсивности  $I$  проходящего через образец света от энергии фотонов. При снятии зависимости  $I(h\nu)$  использовалось световое излучение с длиной волны  $\lambda = 6200\text{--}800$  нм (энергия квантов 0.2–1.5 eV). Поверхностный диаметр ионно-имплантированного участка составлял  $\sim 1.5\text{--}2$  мм, а диаметр светового луча, падающего на поверхность, —  $\sim 0.5\text{--}0.6$  мм. Профили распределения атомов по глубине определялись методом ОЭС в сочетании с травлением поверхности ионами  $\text{Ar}^+$  ( $E_0 = 3$  keV, угол падения относительно нормали  $80\text{--}85^\circ$ ).



**Рис. 1.** Изменение интенсивности оже-пика Co по глубине для Si, имплантированного ионами Co с  $E_0 = 25$  keV при  $D = 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ , 1 — до отжига, 2 — после прогрева при  $T = 900$  K в течение 30 min.



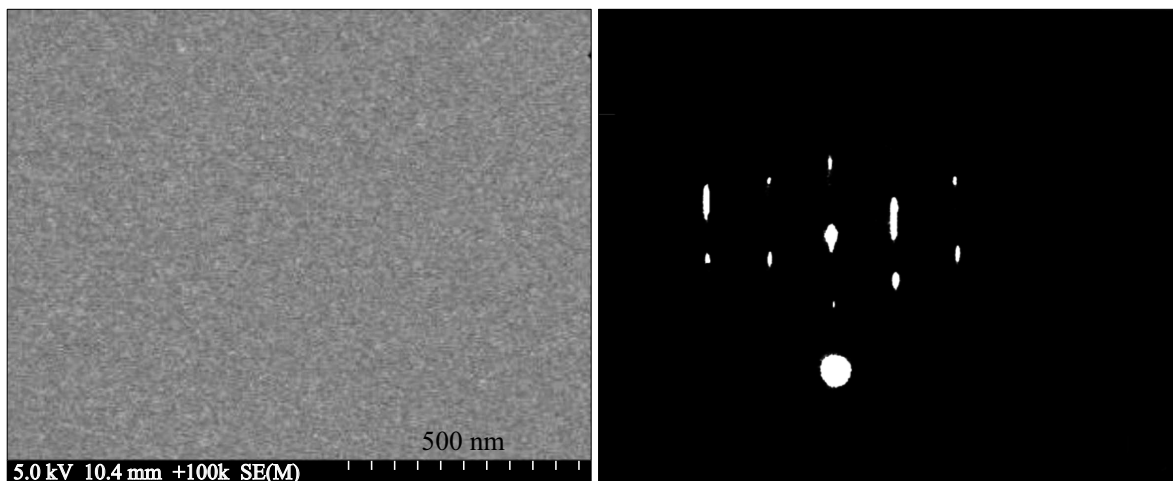
**Рис. 2.** Зависимости интенсивности проходящего света от энергии фотонов для: 1 — Si (111), 2 — Si с нанослоем  $\text{CoSi}_2$  на глубине 18–28 nm.



**Рис. 3.** Концентрационные профили распределения Co по глубине для Si, имплантированного ионами  $\text{Co}^+$  с  $E_0 = 25$  и 1 keV при  $D = 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . После каждого цикла имплантации проводился прогрев при  $T \approx 900 \text{ K}$  в течение 30–40 min и импульсный прогрев до  $T = 1100 \text{ K}$ .

## Результаты и их обсуждение

Для получения двухслойной нанопленочной системы  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (111) сначала имплантация проводилась с высокой, а затем с низкой энергией. После каждого цикла ионной имплантации проводился прогрев при оптимальной температуре ( $T \approx 850\text{--}900 \text{ K}$ ) в течение 30–40 min и кратковременный прогрев при  $T = 1100 \text{ K}$ . На рис. 1 приведены зависимости интенсивности оже-пика Co (765 eV) от глубины для Si, имплантированного ионами  $\text{Co}^+$  с  $E_0 = 25 \text{ keV}$  до и после прогрева при  $T = 900 \text{ K}$ . Из рис. 1 видно, что в обоих случаях кривые  $I_{\text{Co}}(d)$  проходят через максимум, который располагается на глубине 20–25 nm. После прогрева интенсивность пика  $I_{\text{Co}}$  в области максимума существенно увеличивается (в 1.5–2 раза), а полуширина кривой  $I_{\text{Co}}(d)$  — уменьшается и составляет  $\sim 10\text{--}12 \text{ nm}$ . Анализ результатов ОЭС показал, что после отжига в приповерхностном слое на глубине 18–28 nm формируется слой  $\text{CoSi}_2$  с толщиной  $\sim 10\text{--}12 \text{ nm}$ . Для этой системы были сняты зависимости интенсивности  $I$  проходящего света от энергии (длины волны) фотонов (рис. 2). Из рис. 2 видно, что в случае чистого кремния интенсивность света  $I_{\text{CoSi}_2}/I_{\text{Si}}$  резко уменьшается, начиная с  $h\nu = 1.0 \text{ eV}$ , а в случае Si с внутренним нанослоем  $\text{CoSi}_2$  — с  $h\nu = 0.5 \text{ eV}$ , где  $I_{\text{Si}}$  — интенсивность света, проходящего через чистую пленку Si, а  $I_{\text{CoSi}_2}$  — через Si с нанослоем  $\text{CoSi}_2$ . Экстраполяция этих кривых к оси  $h\nu$  показала, что для пленок Si и  $\text{CoSi}_2$  значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  соответственно равны  $\sim 1.1$  и  $\sim 0.6 \text{ eV}$ . Затем этот же образец бомбардировался ионами  $\text{Co}^+$  с  $E_0 = 1 \text{ keV}$  при  $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . После отжига при  $T = 900 \text{ K}$  на поверхности Si формировалась эпитаксиальная нанопленка  $\text{CoSi}_2$  с толщиной 3–3.5 nm. Однако при этом на растровом электронном микроскопическом (РЭМ) изображении наблюдался



**Рис. 4.** РЭМ и ДБЭ картины поверхности системы  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ .

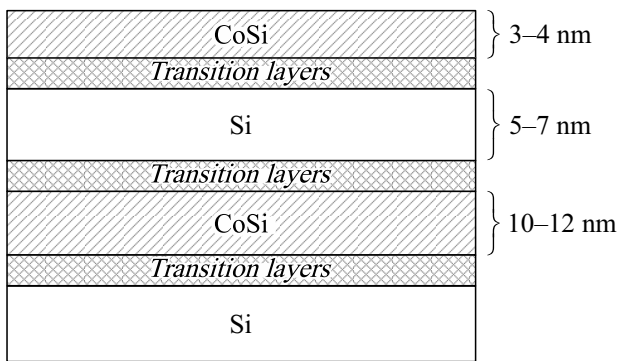


Рис. 5. Схематический разрез двухслойной нанопленочной системы  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ .

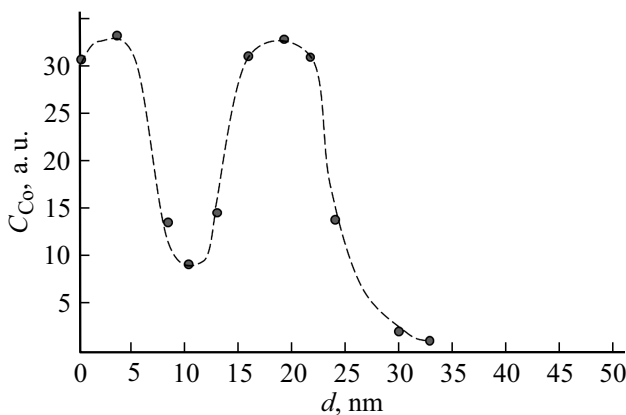


Рис. 6. Концентрационные профили распределения Co по глубине для Si, имплантированного ионами  $\text{Co}^+$  с  $E_0 = 15$  и  $1$  keV. После каждого цикла имплантации проводился прогрев при  $T \approx 900$  K.

диффузный фон, по-видимому, связанный с наличием некоторых фасетированных участков. Кратковременный (импульсный) прогрев до  $T = 1100$  K приводил к исчезновению диффузионного фона. На рис. 3 приведена зависимость концентрации Co по глубине для Si, с двойным слоем  $\text{CoSi}_2$ . Видно, что на поверхностном слое и на глубине  $18\text{--}28$  nm концентрация кобальта составляет  $\sim 30\text{--}40$  at.%, т.е. в этих слоях образуются соединения типа  $\text{CoSi}_2$ . Между слоями  $\text{CoSi}_2$  имеется слой Si с толщиной  $5\text{--}7$  nm. Между слоями  $\text{CoSi}_2\text{--Si}$  и  $\text{Si--CoSi}_2$  имеются переходные слои с толщиной  $6\text{--}8$  nm. На рис. 4 приведены РЭМ изображения и картины дифракции быстрых электронов (ДБЭ) поверхности  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$ . Видно, что сформированные структуры имеют гладкую, зеркальную поверхность. Для наглядности на рис. 5 приведен схематический профиль этой двухслойной системы.

Аналогичные исследования проводились с вариацией энергии ионов в пределах  $12\text{--}15$  и  $1\text{--}3$  keV. На рис. 6 приведены  $C_{\text{Co}}(d)$  для двухслойной системы  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ , полученной после прогрева Si, последовательно имплантированного ионами  $\text{Co}^+$  с  $E_0 = 15$

и  $2$  keV. Видно, что на поверхности и приповерхностном слое Si образуются нанослои  $\text{CoSi}_2$ , толщина поверхностного слоя  $4\text{--}5$  nm, внутреннего слоя —  $10\text{--}12$  nm. Однако между этими слоями практически не образуются слои чистого Si, т.е. происходит перекрывание границ переходных слоев, образующихся на границе раздела  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  и  $\text{Si}/\text{CoSi}_2$ . Результаты экспериментов показали, что для получения двухслойной системы разности между высокой и низкой энергиями ионов должны быть не менее  $20$  keV. С ростом разности энергий толщина слоев чистого Si, образующихся между нанослоями  $\text{CoSi}_2$ , увеличивается. Однако при энергиях ионов больше, чем  $40\text{--}50$  keV, нам не удалось получить однородный слой  $\text{CoSi}_2$ . Отметим, что при высоких энергиях ионов ( $E_0 \geq 40\text{--}50$  keV), варьируя энергию и дозу ионов, можно получить отдельные нанокристаллические фазы  $\text{CoSi}_2$  на различных глубинах Si.

Низкоэнергетическая часть энергии ионов Co также имеет ограничения. При  $E_0 \geq 3$  keV максимум распределения атомов Co смещается в сторону больших глубин, т.е. слой  $\text{CoSi}_2$  может образоваться не на самой поверхности, а вблизи нее, т.е. для получения двухслойной системы  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  оптимальным является энергия ионов  $E_0 = 25\text{--}30$  и  $0.5\text{--}2$  keV.

## Заключение

Таким образом, впервые методом имплантации ионов Co с разными энергиями в сочетании с высокотемпературным прогревом получены наноэпитаксиальные структуры типа  $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (111). Показано, что для создания таких слоев оптимальными являются энергии ионов  $E_0 = 20\text{--}30$  и  $0.5\text{--}2$  keV.

При снижении интервала между высокой и низкой энергиями ионов до величин, меньших  $15\text{--}20$  keV, между слоями  $\text{CoSi}_2$  не формируется однородный слой Si, т.е. происходит перекрывание границ переходных слоев.

Методом изучения интенсивности света, проходящего через пленки, определена ширина запрещенной зоны  $\text{CoSi}_2$ , сформированного в приповерхностном слое Si. Показано, что  $E_g$  нанослоев  $\text{CoSi}_2$  равна  $\sim 0.6$  eV.

## Список литературы

- [1] Bei Li, Jiandin Liu // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 084905.
- [2] Алтухов А.А., Журнов В.В. Анализ морфологии и стехиометрии пленок  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (100), полученных методами ТФЭ и РЭ // Тонкие пленки в электронике: Материалы II-го Всеобщего межотраслевого совещания. Москва–Ижевск, 1991. С. 15–22.
- [3] Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Наумов В.В., Симанин С.Г. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 3. С. 36–44.
- [4] Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Галль Н.Р., Молодцов С.Л., Выход Д.В. // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 8. С. 1519–1522.

- [5] Эргашов Ё.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 5. С. 758–761. [Ergashov Y.S. // Techn. Phys. 2017. Vol. 62. N 5. P. 777–780.]
- [6] Эргашов Ё.С., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 156. [Ergashov E.S., Isakhanov Z.A., Umirzakov B.E. // Techn. Phys. 2016. Vol. 61. N 6. P. 953–955.]
- [7] Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Рузибаева М.К., Ташатов А.К., Донаев С.Б., Мавлянов Б.Б. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 146–149. [Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K., Tashatov A.K., Donaev S.B., Mavlyanov B.B. // Techn. Phys. 2013. V. 58. N 9. P. 1383–1386.]