



## Investigation of Physical Properties of NiSi<sub>2</sub>/Si Nanofilm

**N. M. Mustafoeva**

*Karshi Institute of Irrigation and Agrotechnology, 180003 Karshi, Uzbekistan*

**A. K. Tashatov**

*Karshi State University, 180003 Karshi, Uzbekistan*

**N. M. Mustafaeva, X. J. Mavlonova**

*Karshi Institute of Engineering and Economics, 180003 Karshi, Uzbekistan*

### Abstract

Single epitaxial NiSi<sub>2</sub> nanofilms ~3.0–6.0 nm thick were obtained by low-energy implantation of Ni ions in combination with annealing. The band-energy parameters, the density of electronic states, and the emission and optical parameters of the NiSi<sub>2</sub>/Si(111) system have been studied. The composition, band gap, crystal structure, and electrical properties of the Si (111) surface layers of the NiSi<sub>2</sub>/Si film system were obtained by ion implantation.

**Keywords:** NiSi<sub>2</sub> nanofilms, surface structure, Auger electron spectroscopy, solid phase deposition, morphology.

Пленки CoSi<sub>2</sub> и NiSi<sub>2</sub>, полученные методами молекулярно-лучевой эпитаксии и твердофазной эпитаксии, широко используются в создании МДП- и ПДП-структур, транзисторов с проникаемой и металлической базами, барьерных слоев и омических контактов. Поэтому получению и изучению состава, структуры и свойств тонких пленок силицидов, особенно CoSi<sub>2</sub>, посвящено большое число работ [1-4]. В этих системах толщина пленки силицидов составляет не менее 30-50 нм. Уменьшение толщины этих пленок способствует созданию сверхвысокочастотных транзисторов и интегральных схем, работающих с предельной частотой >100 GHz. Одним из перспективных методов получения нанокристаллов и нанопленок с толщиной  $d < 5-10$  нм на поверхности полупроводников является низкоэнергетическая ионная имплантация [5-9].

В настоящей работе впервые исследованы основные физические свойства наноразмерных структур NiSi<sub>2</sub>, созданных на поверхности Si методом низкоэнергетической ионной имплантации. Объектами исследования являлись монокристаллические образцы n-типа Si(111). Перед ионной имплантацией кремниевые образцы очищались прогревом при вакууме  $P=10^{-7}$  Pa сначала длительно 2-3 ч при  $T=1100$  K и затем кратковременно при  $T=1400$  K. Имплантация ионов Ni<sup>+</sup> проводилась с энергией  $E_0=1-5$  keV при дозе насыщения ( $D=(6-8) \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>). Элементный и химический составы поверхности определяли методом оже-электронной спектроскопии (ОЭС), электронная структура (параметры энергетических зон, плотность состояния валентных электронов)-методами ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и снятия зависимости  $I(h\nu)$ , где I-интенсивность света, проходящая через образец,  $h$ - энергия фотонов ( $h\nu=0.2-1.5$  eV).



Зонно-энергетические, эмиссионные и оптические параметры Si(111) и пленок NiSi<sub>2</sub>/Si(111)

Образец	d, nm	$\varphi$ , eV	$\Phi$ , eV	$E_g$ , eV	$\chi$ , eV	$\sigma_m$	$Y$	$\rho$ , $\mu\Omega \cdot cm$
Si(111)	0	4.7	5.1	1.1	4	1.1	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^6$
NiSi <sub>2</sub> /Si(111)	3.0	4.3	4	0.6	3.4	1.5	$4 \cdot 10^{-4}$	80
	6.0	-	4	0.5	3.5	1.6	$4 \cdot 10^{-4}$	60
	50.0	4.2	4	0.5	3.5	1.6	-	55

Исследования проводились и для пленок NiSi<sub>2</sub>/Si, полученных имплантацией ионов Ni с  $E_0=3$  и 5 keV. При этом после прогрева формировались пленки NiSi<sub>2</sub> с толщиной 4.5-5.0 и 6.0-6.5 nm соответственно. В таблице приведены некоторые физические параметры Si и пленки NiSi<sub>2</sub>/Si с толщиной  $d = 3.0$  и 6.0 nm, где  $\varphi$  и  $\Phi$  - термо и фотоэлектронная работа выхода,  $E_g$ - ширина запрещенной зоны,  $\chi$ -сродство к электрону,  $\sigma_m$ -максимальное значение коэффициента ВЭЭ,  $Y$ -квантовый выход фотоэлектронов,  $\rho$  - удельное сопротивление. Для сравнения там же приведены параметры для толстой пленки NiSi<sub>2</sub> с толщиной 50.0 nm, полученной методом твердофазной эпитаксии. Из таблицы видно, что ширина запрещенной зоны NiSi<sub>2</sub> с  $d = 3.0$  nm составляет 0.6 eV и обладает свойствами, близкими к металлам ( $\rho = 80 \mu\Omega \cdot cm$ ). При этом значение  $\sigma_m$  и  $Y$  увеличивается до 1.5 и 2 раза. По-видимому, эмиссионная эффективность слоев NiSi<sub>2</sub> немного больше, чем эффективности слоев Si, что может быть связано с заметным отличием атомной плотности NiSi<sub>2</sub> ( $\sim 4.5g/cm^3$ ) от плотности Si ( $2.42g/cm^3$ ). Электронные и оптические свойства пленок NiSi<sub>2</sub> с  $d = 6.0$  nm существенно не отличались от таковых для толстой пленки.

Методом низкоэнергетической ( $E_0=1-5$  keV) имплантации ионов Ni в сочетании с отжигом получены однородные эпитаксиальные нанопленки NiSi<sub>2</sub> с толщиной  $\sim 3.0-6.0$  nm. Исследованы зонно-энергетические параметры, плотности электронных состояний, эмиссионные и оптические параметры системы NiSi<sub>2</sub>/Si(111). Показано, что ширина запрещенной зоны нанопленок NiSi<sub>2</sub> составляет  $\sim 0.5-0.6$  eV, квантовый выход фотоэлектронов  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ , удельное сопротивление ( $60 - 80 \mu\Omega \cdot cm$ ).

### Список Литературы

1. Алтухов А.А., Жирнов В.В. Анализ морфологии и стехиометрии пленок CoSi/Si(100), полученных методами ТФЭ и РЭ // Материалы II-го Всесоюзного межотраслевого совещания "Тонкие пленки в электронике": Москва-Ижевск. 1991. С. 15-22.
2. Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Галль Н.Р., Молодцов С.Л., Вялых Д.В. Взаимодействие кобальта с поверхностью окисленного кремния // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 8. С. 1519–1522.
3. Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Наумов В.В., Сима-кин С.Г. Особенности формирования CoSi<sub>2</sub> при двухстадийном быстром термическом отжиге структур Ti/Co/Ti/Si(100)// Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 3. С. 36–44
4. Алексеев А.А., Олянич Д.А., Утас Т.В., Котляр В.Г., Зотов А.В., Саранин А.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 94–100.
5. Umirzakov, B.E., Donaev, S.B. //On the creation of ordered nuclei by ion bombardment for obtaining nanoscale Si structures on the surface of CaF<sub>2</sub> films // Journal of Surface Investigation, 2017, 11(4), стр. 746–748
6. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Mustafоеva N.M., Muradkabilov D.M. // Effect of the Disordering of Thin Surface Layers on the Electronic and Optical



Properties of Si(111) // Semiconductors, 2020, 54(11), стр. 1424–1429

7. A. K. Tashatov, N. M. Mustafojeva // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 81–84.
8. Umirzakov, B.E., Tashmukhamedova, D.A., Tashatov, A.K., Mustafoeva, N.M. //Electronic and Optical Properties of NiSi<sub>2</sub>/Si Nanofilms // Technical Physics, 2019, 64(5), стр. 708–710
9. А.К. Ташатов, Н.М. Мустафоева, Б.Е. Умирзаков. Формирование нанопленок CoSi<sub>2</sub> на поверхности Si при твердофазном осаждении // 51-й Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва 2022 г. с. 152