

**ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ НАНОСИСТЕМЫ Si/NiSi₂/Si,
МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ**

**QATTIQ FAZALI EPITAKSIYA USULI BILAN KO'P QATLAMLI Si/NiSi₂/Si
NANOPLYONKASINI HOSIL QILISH**

**OBTAINING A MULTILAYER NANOSYSTEM Si/NiSi₂/Si BY SOLID-PHASE
DEPOSITION**

Мустафоева Нодира Мойлиевна,

*Университет информационных технологий и менеджмент,
кафедрой «Математика», доктор философских наук по физико-
математическим наукам, доцент*

Юсупов Шахбоз Юнус угли

*Международный инновационный университет, Студент
информационных систем и технологий*

<https://orcid.org/0000-0003-2693-0751>

mustafoyevan@gmail.com

Аннотация. *С использованием методов Оже-электронной спектроскопии, измерения интенсивности проходящего света через образец, растровой электронной микроскопии, дифракция быстрых электронов и удельное сопротивление поверхности исследованы состав, ширина запрещенной зоны, морфология, кристаллическая структура, электрофизические свойства поверхностных слоев на плёночной системы Si/NiSi₂/Si (111), полученных методом твердофазной эпитаксии при различных температурах подложки. Установлено, что границы раздела между слоями Si/NiSi₂ и NiSi₂/Si (111) резкая и толщине переходных слоев не превышает 4-5 нм. Показано что методом ТФЭ невозможно получить трехслойной система Si/NiSi₂/Si (111) с толщиной Si и NiSi₂ менее 20-30 нм, Определены профили распределения атомов Si и Ni по глубине трехслойной системы. Показано, что в процессе твердофазного осаждения Ni на Si в сочетании с отжигом, на поверхности Si формируются эпитаксиальные нанопленки NiSi₂. При толщинах $h \leq 150 \text{ \AA}$ пленки имеют островковый характер. Однородная сплошная пленка NiSi₂ образуется, начиная с $h=200 \text{ \AA}$.*

Abstract. *Using the methods of Auger electron spectroscopy, measuring the intensity of transmitted light through a sample, scanning electron microscopy, high-energy electron diffraction and surface resistivity, the composition, band gap, morphology, crystal structure, and electrical properties of surface layers on the Si/NiSi₂/Si film system were studied. (111), obtained by solid-phase epitaxy at different substrate temperatures. It has been established that the interface between the Si/NiSi₂ and NiSi₂/Si (111) layers is sharp and the thickness of the transition layers does not exceed 4-5 nm. It has been*

shown that using SPE it is impossible to obtain a three-layer Si/NiSi₂/Si (111) system with a thickness of Si and NiSi₂ less than 20-30 nm. The profiles of the distribution of Si and Ni atoms along the depth of the three-layer system have been determined. It has been shown that in the process of solid-phase deposition of Ni on Si in combination with annealing, epitaxial NiSi₂ nanofilms are formed on the Si surface. At thicknesses $h \leq 150$ Å, the films have an island character. A homogeneous continuous NiSi₂ film is formed starting from $h = 200$ Å.

Аннотация. Оје електрон спектроскопијаси, намуна орқали о'тадиган yorug'lik intensivligini o'lchash, skanerlash elektron mikroskopi, yuqori energiyali elektron difraktsiyasi va sirt qarshiligini o'lchash usullarini qo'llash yordamida sirt qatlamlarining tarkibi, tarmoqli oraliq'i, sirt tuzilishi, kristal tuzilishi va elektr xususiyatlari Si/NiSi₂/Si (111) plyonka tizimi o'rganildi, har xil substrat haroratida qattiq fazali epitaksiya yo'li bilan olingan Si/NiSi₂/Si(111) yupqa plyonka tizimi o'rganildi. Aniqlanishicha, Si/NiSi₂ va NiSi₂/Si (111) qatlamlari orasi keskin va o'tish qatlamlarining qalinligi 4-5 nm dan oshmaydi. Qattiq fazali epitaksiya usuli yordamida Si va NiSi₂ qalinligi 20-30 nm dan kam bo'lgan uch qatlamli Si/NiSi₂/Si (111) tizimini olish mumkin emasligi ko'rsatilgan. Si va Ni atomlarining hajm bo'ylab taqsimlanishi uch qatlamli tizimning chuqurligi aniqlangan. Aniqlanishicha, Ni ning qattiq fazali yotqizilishi jarayonida Si yuzasida tavlaniş bilan birgalikda epitaksial NiSi₂ nanoplyonkalar hosil bo'ladi. $h \leq 150$ Å qalinligida plyonkalar orolchali xarakteriga ega. $h = 200$ Å dan boshlab bir hil uzluksiz NiSi₂ plyonkasi hosil bo'ladi.

Ключевые слова: гетероструктура, нанопфаза, ширина запрещенной зоны, нанослой, нанокристаллические фазы, имплантация ионов, морфология, силицид, переходной слой.

Key words: heterostructure, nanophase, width of the prohibited zone, nano -layer, nanocrystalline phases, ion implantation, morphology, silicide, transition layer.

Калит сўзлар: гетероструктура, нанопазалар, тақиқланган зонанинг кенглиги, наноқатлам, нанокристалл фазалар, ион имплантацияси, морфология, силицид, ўтиш қатлами.

При создании СВЧ транзисторов и интегральных схем на основе наноразмерных гетероэпитаксиальных ПДП и МДП структур особое требования представляется к типу материала, толщине и свойствам контактирующего материалы. К ним прежде всего относятся малая толщина переходного слоя Me-ПП, неизменность состава и морфологическая совершенство поверхности пленки, стабильность свойств контактов в процессе изготовления и эксплуатации, сохранение барьерных свойств по отношению к Si в широком диапазоне температур и при высоких токовых нагрузках и др. Для получения хорошего омического контакта необходимо уменьшить удельное сопротивления до 50-100 мкОм·см [1-3].

В работах [4,5] изучены влияния низкоэнергетической ионной имплантации на кристаллическую и электронную структуры монокристаллов Si. Показано, что при этом происходит разупорядочение приповерхностных слоев, формирование

различных дефектов вплоть до полного разупорядочения приповерхностных слоев этих монокристаллов. После температурного прогрева образовались нанопленки типа MeSi_2 . Показано, что ширина запрещенной зоны E_g наноразмерных фаз типа MeSi_2/Si заметно больше, чем E_g массивных пленок MeSi_2 . Оценены размеры наноструктур при которых начинают проявляться квантово-размерные эффекты. Однако, до настоящего времени не имеются достоверные сведения о возможности получения наноразмерных слоев Si на поверхности системы NiSi_2/Si (111). Интерес к получению и изучению свойств системы NiSi_2/Si обусловлено тем, что NiSi_2 и Si имеют кубическую решетки и их постоянные решетки практически не отличается друг от друга ($a_{\text{Si}} \approx 5,41 \text{ \AA}$, $a_{\text{Ni}} \approx 5,42 \text{ \AA}$). И на границе NiSi_2/Si (111) не возникает дефекты не соответствия. Кроме того удельное сопротивление NiSi_2 составляет $\sim 50\text{-}60 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Поэтому эти структуры очень перспективнее в создание гетероэпитаксиальных МДП и ПДП систем.

В данной работе приводятся экспериментальные результаты по изучению состава, морфологии и электронной структуры нанопленок Si, полученных на поверхности NiSi_2/Si (111) методом твердофазного осаждения при температуры подложки 1000 K. с последующим отжигом.

В качестве подложки использованы монокристаллические образцы Si (111). Перед осаждением пленок кремниевые образцы очищались прогревом в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-7} \text{ Па}$) при $T = 1100 \text{ К}$ в течении 2–3 часов и при $T = 1400 \text{ К}$ кратковременно ($\sim 10 \text{ мин}$). При этом поверхность полностью очищается от кислорода (в пределах чувствительности ОЭС). Перед напылением, проволоки из особо чистого Ni обезгаживались в течении 5–6 часов при вакууме не хуже, чем 10^{-5} Па . Скорость напыления пленок Ni определялась предварительно и составляла $\sim 5 \text{ \AA/мин}$. Толщина NiSi_2 составляла $\sim 20 \text{ нм}$. Для создания трехслойной системы на поверхности гетероэпитаксиальной структуры NiSi_2/Si (111) при $T=1000 \text{ К}$ напылялась пленки Si с толщиной $\sim 50 \text{ нм}$. Испарение кремния осуществлялось электронной бомбардировкой. Напыление атомов Ni и Si прогрев образцов, исследования их состава и параметров энергетических зон с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС) и измерение интенсивности проходящего через образец света проводились в одном и том же приборе в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-7} \text{ Па}$). Морфология поверхности изучалась методами растровой электронной микроскопии (РЭМ). При снятии зависимости $I(h\nu)$ использовалось световое излучение с длиной волны $\lambda=6200\text{-}800 \text{ nm}$ (энергия квантов 0,2-1,5 эВ). Профили распределения атомов по глубине определялись методом ОЭС в сочетании с травлением поверхности ионами Ar^+ с энергией 3 кэВ, при угле падения 80-850 относительно нормали.

На рис 1 приведены РЭМ-изображения и ДБЭ-картина (вставка) поверхности Si/ NiSi_2/Si (111). Видно, что при $T=1000 \text{ К}$ растет сплошная поликристаллическая пленки [5-7].



Уменьшение толщины напыляемой пленки Si до 10 нм также позволило уменьшить температуру образования монокристаллической пленки до 950-1000 К. Однако при такой температуре не формировалась сплошная однородная пленка Si. Эти исследования показали что методом ТФЭ невозможно получить трехслойной системы Si/NiSi₂/Si(111) с толщиной менее 20-30 нм.

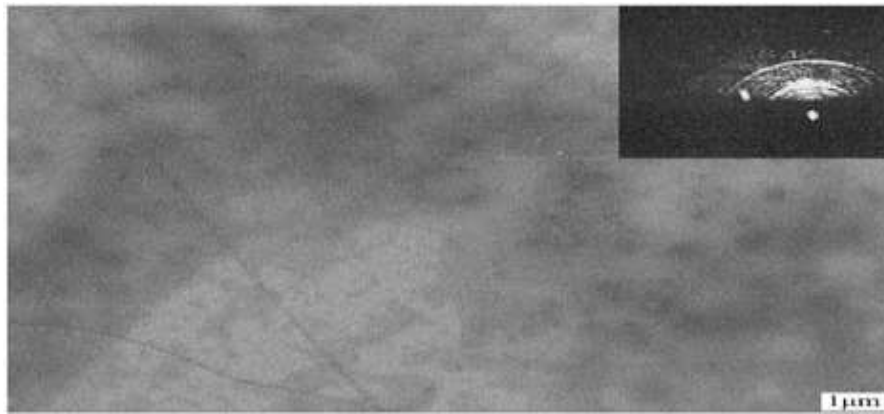


Рис. 1. РЭМ- и ДБЭ (вставка) изображения поверхности системы Si/NiSi₂/Si(111). Пленки Si напылялось при T≈1000 К с толщиной ~50 нм

На рис.2 приведены зависимости интенсивности проходящего света I от энергии фотонов $h\nu$ для Si(111) и системы Si/NiSi₂/Si(111). $d_{\text{NiSi}_2} = 20 \text{ нм}$, $d_{\text{Si}} = 50 \text{ нм}$. Где $I = \frac{I_{\text{NiSi}_2}}{I_{\text{Si}}}$; Принята что $I_{\text{Si}} = 1$. Видно, что значение E_g для Si(111) составляет ~1,1 эВ, а для слоя NiSi₂ ≈ 0,57-0,58 эВ.

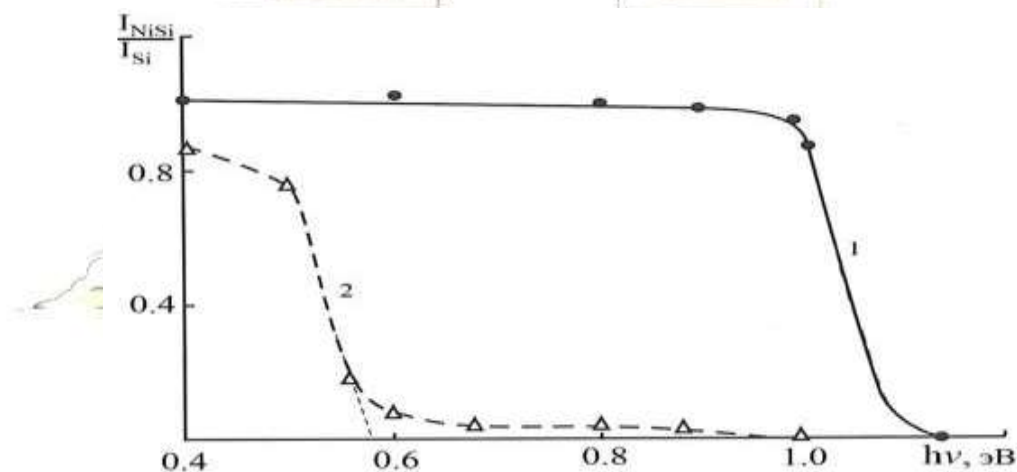


Рис.2. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для 1- чистого Si(111); 2-системы Si/NiSi₂/Si (111). $d_{\text{NiSi}_2} = 20 \text{ нм}$, $d_{\text{Si}} = 50 \text{ нм}$.

Из рис. 3 видно, что с ростом T от 500 до 900 К значение ρ практически не меняется, в интервале T=900-1100 К ρ уменьшается до минимума ($\rho \approx 15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Для трехслойной системы изучены влияния отжига на удельное сопротивление пленки Si (рис. 3).

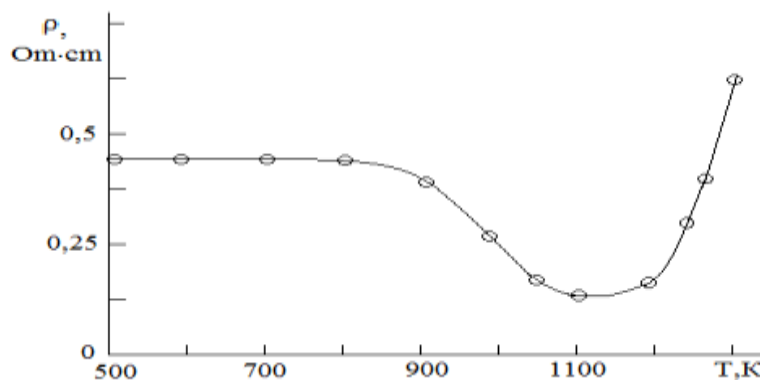


Рис. 3. Зависимость $\rho(T)$ для пленок Si в системе Si/NiSi₂/Si(111).
 $d_{Si} = 50$ нм, $d_{NiSi_2} = 20$ нм время прогрева при каждой T составляет 40 мин

Впервые методом твердофазного осаждения в сочетании с отжигом получены нанопленочная система Si/NiSi₂/Si(111). Определены профили распределения атомов Si и Ni по глубине трехслойной системы. При напыления Si на поверхность эпитаксиальный гетераструктуры NiSi₂ / Si (111) при $T \approx 1000$ К формировалась сплошная, однородная пленка Si. При увеличении T до 1050 К разложению вместе поликристаллические пленка Si формировались крупночешуйчатые блоки, что объясняется переходу сплошной пленки NiSi₂ на островковые. При $T \approx 1100$ К наблюдается разложение NiSi₂ на составляющие и частичной (~ 3-4 час) диффузии Ni к поверхности, что приводит к уменьшению ρ пленки Si.

Показано, что в процессе твердофазного осаждения Ni на Si в сочетании с отжигом, на поверхности Si формируются эпитаксиальные нанопленки NiSi₂. При толщинах $h \leq 150$ Å пленки имеют островковый характер. Однородная сплошная пленка NiSi₂ образуется, начиная с $h = 200$ Å. Определены удельное сопротивление и ширина запрещенной зоны пленки NiSi₂.

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 CoSi₂ 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.](#), [Tashmukhamedova D.A.](#), [Tashatov A.K.](#), [Mustafoeva 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. <https://doi.org/10.1134/S1063782620110263>

[6]. Tashatov A. K., Mustafeyeva N. M. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 81–84. DOI: 10.1134/S1027451020010188

[7]. [Umirzakov, B.E.](#), [Tashmukhamedova, D.A.](#), [Tashatov, A.K.](#), [Mustafeyeva, N.M.](#) // [Electronic and Optical Properties of NiSi₂/Si Nanofilms](#) // [Technical Physics](#), 2019, 64(5), стр. 708–710. DOI: [10.21883/JTF.2019.05.47481.192-18](https://doi.org/10.21883/JTF.2019.05.47481.192-18)

