

DOI: 10.20535/kpissn.2025.1.322112

УДК 539.216.2:661.685

Л.С. Левчук¹, Р.А. Шкарбань¹, Т.І. Вербицька^{1*}, Ю.М. Макогон¹¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: verbitska@kpm.kpi.ua

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ
НА ТЕРМІЧНУ СТАБІЛЬНІСТЬ ФАЗИ NiSi У ПЛІВКАХ Ni(Pt)Si

Проблематика. Підвищити швидкодю, ступінь інтеграції мікросхем та їх надійної експлуатації можна завдяки застосуванню термічно стійких нанорозмірних плівок-силіцидів, перехідних металів як функціональних елементів. Напруження у структурах є загальною проблемою мікроелектроніки, яку слід враховувати на всіх етапах виробництва, зберігання та експлуатації як дискретних приладів, так і інтегральних схем.

Мета дослідження. Дослідження впливу напруженого стану та легувального елемента Pt на фазовий склад і термічну стабільність моносиліциду нікелю NiSi у нанорозмірних плівках [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм] та [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм] на підкладках монокристалічного Si(001) під час відпалу у вакуумі в інтервалі температур 400–1000 °С.

Методика реалізації. Нанорозмірні плівки осаджено методом магнетронного розпорощення на підкладки Si(001) за кімнатної температури. Відпал зразків проводився у вакуумі $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в інтервалі температур 400–1000 °С. Методами рентгеноструктурного фазового аналізу, мас-спектрометрії вторинних нейтралей і резистометрії (чотиризондовий метод) досліджено вплив Pt на зміну напруженого стану та термічну стабільність фази NiSi у плівках Ni(Pt) на монокристалічній підкладці Si(001).

Результати дослідження. Визначено вплив внутрішніх механічних напружень і вмісту легувального елемента Pt у плівці на послідовність, температуру формування силіцидних фаз і термічну стабільність моносиліциду нікелю NiSi під час відпалу у вакуумі.

Висновки. Встановлено, що додавання Pt у плівку Ni приводить до підвищення температури формування моносиліциду нікелю порівняно із плівкою Ni (30 нм). Моносиліцид нікелю NiSi починає формуватись у плівках з 1 ат. % Pt та 8 ат. % Pt після відпалу за температур 500 °С та 450 °С відповідно. Підвищення термічної стійкості NiSi пов'язано зі значним зменшенням рушійної сили фазового переходу NiSi у NiSi₂ за рахунок формування твердого розчину Ni_xPt_{1-x}Si, який має меншу вільну енергію, що обумовлено позитивним внеском добуток $T \cdot \Delta S$.

Ключові слова: напружений стан; NiSi; фазовий склад; нанорозмірні плівки; відпал; вакуум.

Вступ

Закономірності фазоутворення у плівках Ni(Pt) на підкладках монокристалічного Si(001) є ключовим фактором, який впливає на створення і функціонування на їх основі напівпровідникових пристроїв [1], мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [2], каталізаторів та мембран як у хімічній промисловості [3], так і для потреб екології [4].

Існує шість стабільних фаз силіциду нікелю – Ni₃Si, Ni₃₁Si₁₂, Ni₂Si, Ni₃Si₂, NiSi та NiSi₂, які є близькими за стехіометрією [5]. У тонких плівках на утворення фаз впливає багато факто-

рів – підкладка, додавання легувальних елементів, товщина шарів, середовище відпалу, метод нанесення тонкої плівки. Для потреб мікроелектроніки найбільш затребуваним є моносиліцид нікелю NiSi [6]. Завдяки низькому опору (~ 10 мкОм·см) NiSi використовують для затвора транзисторів з топологічними розмірами, що не перевищують 65 нм [7, 8]. Утім, зменшення товщини плівок силіцидів нікелю призводить до різкої зміни послідовності утворення фаз, характерних для масивних зразків [9].

Головним недоліком використання фази NiSi є її стабільність лише до 600–800 °С [10], тобто зі зростанням температури в моносиліциді

Пропозиція для цитування цієї статті: Л.С. Левчук, Р.А. Шкарбань, Т.І. Вербицька, Ю.М. Макогон, “Особливості впливу напруженого стану на термічну стабільність фази NiSi у плівках Ni(Pt)/Si”, *Наукові вісті КПІ*, № 1, с. 37–43, 2025. doi: 10.20535/kpissn.2025.1.322112

Offer a citation for this article: Leonid Levchuk, Ruslan Shkarban, Tetiana Verbitska, Yuriy Makogon, “Features of the influence of the stress state on the thermal stability of the nisi phase in Ni(Pt)/Si films”, *KPI Science News*, no. 1, pp. 37–43, 2025. doi: 10.20535/kpissn.2025.1.322112

нікелю порушується структурна однорідність – спостерігається агломерація [11]. Якщо температура відпалу перевищує 800 °С, шорсткість NiSi збільшується завдяки утворенню фази з більшим питомим опором NiSi₂ [4].

Оскільки 75 % технологічних операцій з виготовлення інтегральних схем здійснюється за підвищених температур після того, як силіцидна плівка сформована [12], завдання з підвищення її термостабільності є найбільш актуальним. Відомо багато наукових робіт, присвячених розширенню температурного інтервалу існування фази NiSi [7] і факторів, що на нього впливають [13]. У результаті численних експериментів було встановлено, що збільшити однорідність та температурний інтервал існування NiSi можна, застосовуючи легування металами (до 10 % ат.) [14] або напилюючи тонку металеву плівку на поверхню силіциду ([15]) чи між його шарами. Металом, який найкраще підвищує температуру агломерації, запобігає виникненню небажаних фаз і не викликає зменшення питомого опору, є Pt [16, 17]. У роботі [18] автори показали, що прошарок Pt знижує теплоту утворення NiSi, що і приводить до термічної стабільності цієї фази. Утім, використання Pt підвищує вартість як виробу, так і технологічного процесу. Знизити вартість можна, якщо нанести на підкладку плівку сплаву NiPt. У науковій літературі немає відомостей щодо оптимального елементного складу сплаву NiPt та його впливу на термічну стабільність фаз, що виникають. Зазвичай у виробництві інтегральних схем використовують плівку сплаву NiPt, який наносять на підкладку Si.

Під впливом температури під час швидкого відпалу зазвичай утворюється твердий розчин NiPtSi [19–20]. У роботі [21] показано підвищення термічної стабільності NiSi та перешкоджання переходу в NiSi₂ під час високотемпературного відпалу. Зниження теплоти утворення NiSi, викликане прошарком Pt, запропоновано як засіб для підвищення термічної стабільності у роботі [22].

Постановка задачі

Знання закономірностей фазоутворення у плівках Ni(Pt) на підкладках монокристалічного Si(001) безпосередньо впливає на створення та функціонування на їх основі напівпровідникових пристроїв і мікроелектромеханічних систем. Напружений стан і додавання легувального елемента Pt змінюють температуру початку утворення та інтервал існування моно-

силіциду нікелю NiSi у нанорозмірних плівках [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм] та [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм] на підкладках монокристалічного Si(001) під час відпалу у вакуумі в інтервалі температур 400–1000 °С.

Методика дослідження

Нанорозмірні плівки [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм] та [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм] осаджено методом магнетронного розпорощення на підкладки монокристалічного кремнію Si(001) за кімнатної температури. Відпал відбувався у вакуумі $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в інтервалі температур 400 °С – 1000 °С. Зразки нагрівалися протягом 3 хв – 5 хв, витримувалися за відповідної температури відпалу 30 с, а потім охолоджувалися до температури ~ 45 °С без розвакуування.

Дослідження фазового складу і структури плівок після осадження та відпалів проводилось методом рентгеноструктурного фазового аналізу з фотографічною реєстрацією (випромінення Co K $\alpha_{1,2}$, $\lambda_{Co} = 1,79\ 021$ Å) у камері Дебая. Термічні напруження оцінювали за формулою

$$\sigma_T = \Delta\alpha \cdot \Delta T \left(\frac{E}{1 - \nu} \right),$$

де E – модуль Юнга плівки;

ν – коефіцієнт Пуассона;

ΔT – різниця між кімнатною температурою і температурою відпалу;

$\Delta\alpha$ – різниця між коефіцієнтами термічного розширення підкладки і плівки. Негативне значення s означає, що у плівці є напруження стиску, а позитивне – напруження розтягу. Залишкові механічні напруження було оцінено за зміною об'єму після утворення силіцидів нікелю для рефлексу Ni(111) та NiSi(021). Електроопір вимірювали чотиризондовим методом. Розподіл елементів по товщині плівки досліджено методом мас-спектрометрії вторинних нейтралей (МСВН).

Результати дослідження та їх обговорення

Фазові перетворення у плівці [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм]/Si(001)

На рентенограмі плівки (Ni + 1 ат. % Pt) після осадження ідентифіковано текстуровані рефлекси від Ni та Pt (рис. 1). На рис. 2, a – e показано пошаровий хімічний аналіз розподілу елементів за товщиною у плівці (Ni + 1 ат. % Pt).

Оскільки між осадженою плівкою сплаву (Ni + 1 ат. % Pt) і кремнієм підкладки межа поділу чітка, можна зробити висновок, що взаємної дифузії між ними не відбувається.

Під час відпалу за температури 400 °C починаються взаємна дифузія і перебіг твердотільних реакцій між плівкою та підкладкою (рис. 1).

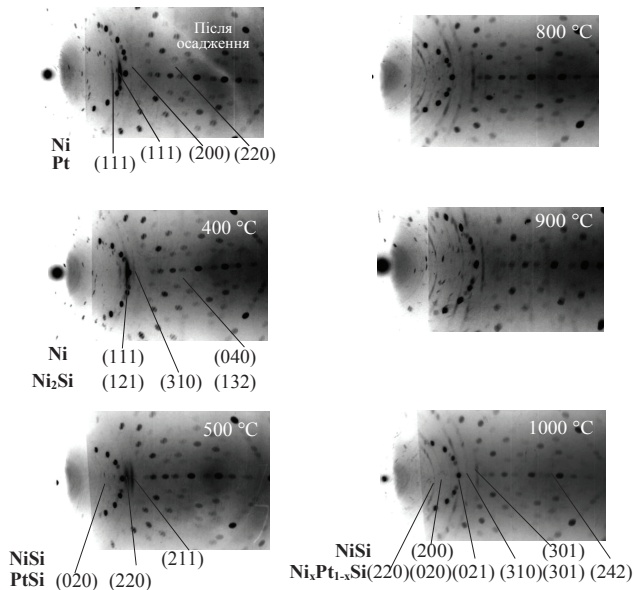


Рис. 1. Рентгенограми від плівок (Ni + 1 ат. % Pt) після осадження і відпалу у вакуумі за температур 400 °C – 1000 °C

На рентгенограмі з'являються рефлекси фази силіциду Ni₂Si, збагаченого Ni, що супроводжується підвищенням електроопору (рис. 3). Це пояснюється тим, що більша частина нікелю дифундує у кремній раніше, ніж утворюються інтерметалідні сполуки за вищих температур. Ще однією причиною може бути зміна коефіцієнта термічного розширення твердого розчину з температурою відпалу. Пошаровий хімічний аналіз плівки (Ni + 1 ат. % Pt) після відпалу за 450 °C підтверджує наявність двох фаз Ni та силіциду Ni₂Si (рис. 2, б).

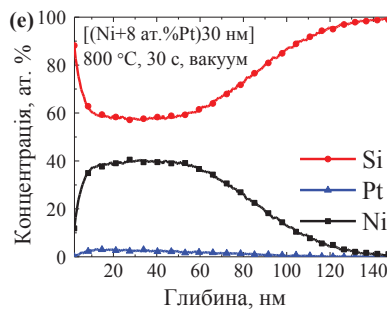
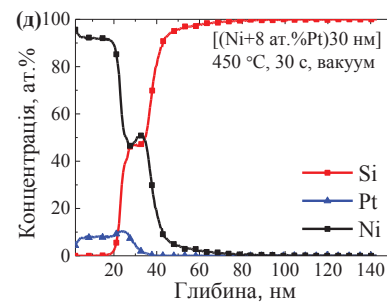
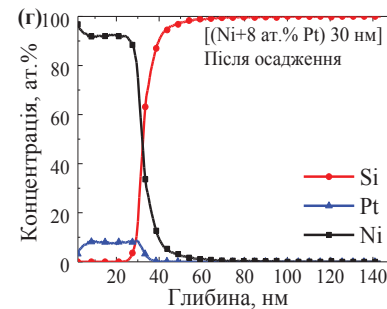
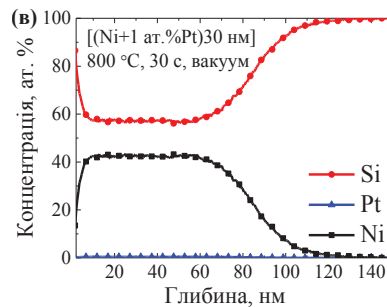
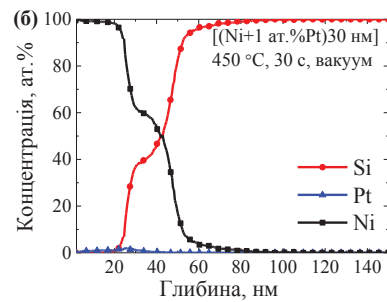
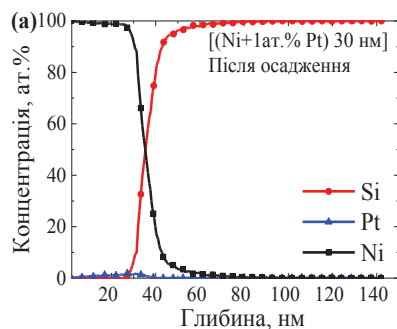


Рис. 2. Пошаровий хімічний аналіз розподілу елементів по товщині плівок [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм] та [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм] після осадження (а, з) і відпалу за температур 450 °C (б, д) та 800 °C (в, е)

Відпал за 500 °C супроводжується зниженням електроопору, що пов'язано з появою фази моносиліциду нікелю NiSi (рис. 3). Під час відпалу за температури 600 °C у плівці з'являються рефлекси потрійного силіциду $Ni_xPt_{1-x}Si$, електроопір якого дещо вищий, ніж у NiSi, який утворюється у нелегованій платиною плівці Ni(30 нм)/Si (рис. 3). Подальше підвищення температури відпалу до 800 °C якісно дифракційної картини не змінює (рис. 1). Пошаровий хімічний аналіз розподілу елементів за товщиною за цієї температури підтвердив наявність фази NiSi. Pt поширена по всій товщині силіцидної плівки (рис. 2, *в*). Дані пошарового хімічного аналізу показують, що твердотільні реакції відбулись по всій товщині плівки. На це вказує форма профілів концентрації елементів Ni, Pt та Si – на кожному із них утворилась поличка. Розміщення поличок одна під одною вказує на утворення у зразку фази NiSi, в якій рівномірно розміщена Pt.

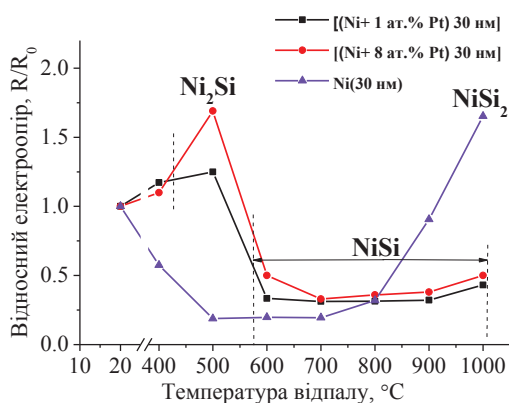


Рис. 3. Зміна відносного електроопору плівок [(Ni+1 ат. % Pt) 30 нм], [(Ni+8 ат. % Pt) 30 нм] та Ni (30 нм) з температурою відпалу

У табл. 1 наведено дані про зміну фазового складу у плівці (Ni+1 ат. % Pt) з температурою відпалу.

Таблиця 1. Зміна фазового складу плівки з температурою відпалу

Температура відпалу, °C	Фазовий склад
Після осадження	Ni, Pt
400	Ni, Ni ₂ Si
450	Ni, Ni ₂ Si
500	NiSi, PtSi
600	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
700	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
800	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
900	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
1000	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si

На рис. 4 показано зміну розрахункових термічних напружень у шарах Ni, NiSi на підкладці монокристалічного кремнію та NiSi на NiSi₂. У шарі Ni на кремнії більший рівень напружень стиску, ніж у NiSi в інтервалі температур 400 °C – 500 °C.

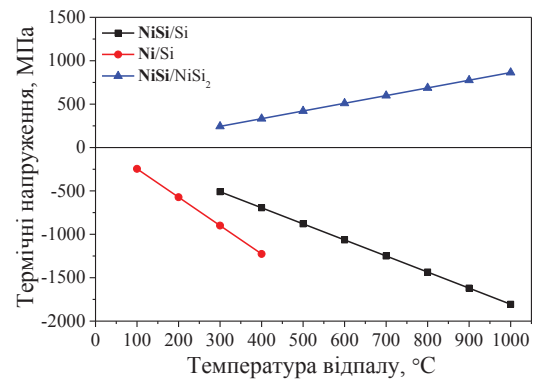


Рис. 4. Зміна термічних напружень у плівках Ni та NiSi на межі з підкладкою та NiSi₂ з температурою відпалу

Підвищення температури відпалу до 1000 °C супроводжується збільшенням рівня термічних напружень стиску у шарі NiSi на межі з підкладкою. Розрахунок термічних напружень показує, що формування NiSi на межі поділу з Ni₂Si та NiSi₂ змінює знак напружень на напруження розтягу, унаслідок унаслідок того, що коефіцієнти термічного розширення цих силіцидів більші, ніж моносиліциду нікелю. Додавання легувального елемента також може змінити величину і знак цих напружень, що буде впливати на температуру початку утворення силіцидів (рис. 4).

Фазові перетворення у плівці [(Ni+8 ат. % Pt) 30 нм]/Si(001)

На рис. 5 показано рентгенограми плівок (Ni+8 ат. % Pt) з більшим вмістом легувального елемента. Після осадження ідентифіковано наявність твердого розчину Ni(Pt).

На рис. 2, *г-е* подано пошаровий хімічний аналіз розподілу елементів за товщиною у плівці (Ni+8 ат. % Pt). Між плівкою сплаву і кремнієм підкладки наявна чітка межа поділу, тобто взаємної дифузії між ними не спостерігається. Pt рівномірно розподілена по товщині плівки (рис. 2, *г*). На рентгенограмі після відпалу за температури 400 °C з'являються рефлекси силіциду Ni₂Si (рис. 5). Це вказує на початок взаємної дифузії між Ni та Si.

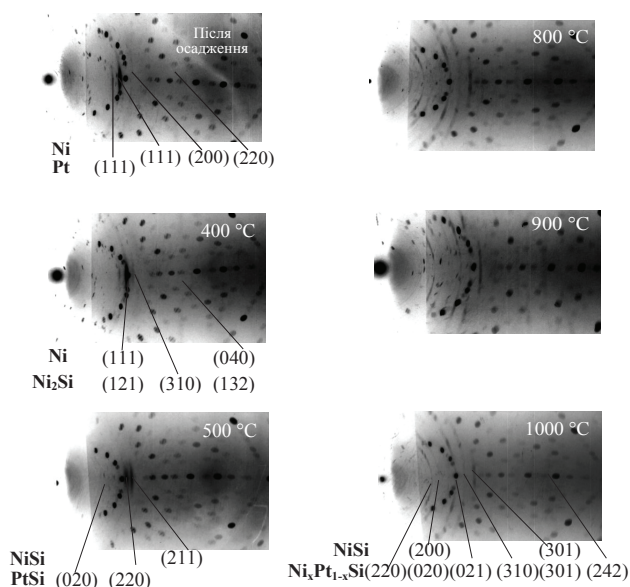


Рис. 5. Рентгенограми від плівок [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм]/Si(001) після осадження та відпалу у вакуумі за температур 400 °C – 1000 °C

У плівці з більшим вмістом платини під час відпалу за 450 °C частина нікелю прореагувала з кремнієм підкладки, але першим почав формуватись моносиліцид нікелю NiSi. Товщина нікелю, що не прореагувала з кремнієм, становить ~20 нм. Pt нерівномірно розподілена за товщиною моносиліциду нікелю (рис. 2, д).

Під час подальшого відпалу за температур 600 °C – 800 °C у плівці утворюється потрійний силіцид $Ni_xPt_{1-x}Si$. У табл. 2 наведено зміну фазового складу з температурою відпалу у плівці (Ni + 8 ат. % Pt).

Таблиця 2. Зміна фазового складу плівки у плівці (Ni + 8 ат. % Pt) з температурою відпалу

Температура відпалу, °C	Фазовий склад
Після осадження	Ni, Pt
400	Ni, Ni ₂ Si
450	Ni, NiSi
500	NiSi, PtSi
600	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
700	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
800	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
900	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si
1000	NiSi, Ni _x Pt _{1-x} Si

Дані пошарового хімічного аналізу показують, що твердотільні реакції відбулись по всій товщині плівки (рис. 2, е). NiSi та потрійний силіцид $Ni_xPt_{1-x}Si$ залишаються термічно стабільними до температури відпалу 1000 °C (рис. 5).

У табл. 3 наведено результати розрахунку зміни об'єму під час утворення силіцидів нікелю. Оскільки змінення об'єму під час утворення силіциду має позитивне значення, то у плівці під час утворення силіцидів нікелю наявні напруження стиску різної величини.

Таблиця 3. Зміна об'єму під час утворення силіцидів нікелю

Тип реакції	Зміна об'єму ΔV , %	Тип напружень
$2Ni + Si = NiSi$	47	Стиску
$Ni_2Si + Si = 2NiSi$	33,7	Стиску
$Ni + Si = NiSi$	52,6	Стиску
$Si + NiSi = NiSi_2$	34,2	Стиску

Під час нагрівання тонкоплівкові силіциди перехідних металів мають напруження стиску, оскільки у них температурний коефіцієнт лінійного розширення більший, ніж у кремнію.

Результати розрахунку структурних напружень у плівках (Ni + 1 ат. % Pt) та (Ni + 8 ат. % Pt) показано на рис. 6. Зі збільшенням температури відпалу внаслідок утворення фази NiSi у плівках відбувається релаксація напружень.

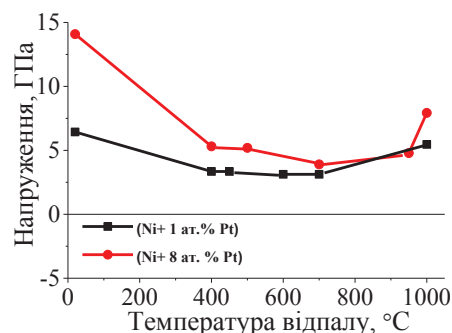


Рис. 6. Зміна структурних напружень у плівках (Ni + 1 ат. % Pt) та (Ni + 8 ат. % Pt) з температурою відпалу

Утворення NiSi в обох плівках також супроводжується різким зменшенням електроопору, який має більше значення, ніж у плівці Ni (30 нм) (див. рис. 3). Збільшення концентрації платини до 8 ат. % супроводжується майже однаковою послідовністю розвитку твердофазних реакцій силіцидоутворення, як у плівці з 1 % Pt, але зміщує їх початок у бік більш високих температур відпалу порівняно з плівкою нікелю без легувального елемента. Відмінність спостерігається тільки за температури відпалу 450 °C, де у плівці з меншим вмістом Pt формується збагачений на Ni силіцид Ni₂Si, а у плівці з більшим вмістом Pt – моносиліцид NiSi.

За результатами досліджень очевидним є те, що у плівках Ni, легованих Pt, розширюється інтервал існування фази NiSi до 1000 °С.

Таким чином, додавання Pt стабілізує потрібну силіцидним технологіям фазу NiSi та розширює інтервал її існування за рахунок утворення твердого розчину NiSi-PtSi. Це пов'язано зі значним зменшенням рушійної сили фазового переходу NiSi в NiSi₂. Твердий розчин Ni_xPt_{1-x}Si має меншу вільну енергію, що обумовлено позитивним внеском $T \cdot \Delta S$, де T і ΔS – температура термообробки і зміна ентропії змішування відповідно. При цьому підвищується енергетичний бар'єр для формування зародків дисиліциду NiSi₂.

Висновки

Встановлено, що формування силіцидних фаз у плівках [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм] та [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм] на монокристалічних підкладках Si(001) різняться від діаграм фазової

рівноваги для масивного стану і відбувається в інших температурних інтервалах.

Встановлено, що збільшення рівня механічних напружень розтягу у плівці з більшим вмістом Pt (8 ат. %) підвищує температуру формування моносиліциду нікелю порівняно з плівкою Ni (30 нм). Моносиліцид нікелю NiSi починає формуватись у плівках [(Ni + 1 ат. % Pt) 30 нм]/Si(001) та [(Ni + 8 ат. % Pt) 30 нм]/Si(001) після відпаду за температури 500 °С та 450 °С відповідно.

Визначено, що додавання легувального елемента Pt у плівку Ni збільшує термічну стабільність моносиліциду нікелю і розширює інтервал його існування до 1000 °С за рахунок формування твердого розчину Ni_xPt_{1-x}Si. Це пов'язано зі значним зменшенням рушійної сили фазового переходу NiSi у NiSi₂ за рахунок меншої вільної енергії твердого розчину, що обумовлено позитивним внеском $T \cdot \Delta S$.

У подальшому передбачається дослідити вплив середовища відпаду на формування моносиліциду нікелю та його термічну стабільність.

References

- [1] J.-G. Min *et al.*, “Implementation of ambipolar polysilicon thin-film transistors with nickel silicide Schottky junctions by low-thermal-budget microwave annealing”, *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 4, 628 p. DOI: 10.3390/nano12040628
- [2] P.C. Yeh *et al.*, “A Novel three-axial magnetic-piezoelectric mems ac magnetic field sensor”, *Micromachines*, Basel, 2019, vol. 10, no. 10, 710 p. DOI: 10.3390/mi10100710
- [3] R. Artal *et al.*, “Electrodeposition of mesoporous Ni-Rich Ni-Pt films for highly efficient methanol oxidation”, *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 8, 1435 p. <http://dx.doi.org/10.3390/nano10081435>
- [4] Sudiyarmanto and Eiichi Kondoh, “Synthesis and Characterization of Ni-Pt Alloy Thin Films Prepared by Supercritical Fluid Chemical Deposition Technique”, *Nanomaterials*, Basel, 2021, vol. 11, no. 1, 151 p. <http://dx.doi.org/10.3390/nano11010151>
- [5] R. Kumar *et al.*, “Phase selective synthesis of nickel silicide nanocrystals in molten salts for electrocatalysis of the oxygen evolution reaction”, *Nanoscale*, 2020, vol. 12, no. 28, pp. 15209–15213. <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02923099v1>
- [6] Wu Chi-Ting *et al.*, “In-situ Rs and improvement in thermal stability of nickel silicides using different interlayer films”, *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 5, no. 3–4, pp. 159–165. <http://dx.doi.org/10.17265/2161-6213/2015.3-4.008>
- [7] S.-L. Zhang, “Self-aligned silicides for ohmic contacts in complementary metal-oxide semiconductor technology: TiSi₂, CoSi₂, and NiSi”, *J. Vac. Sci. Technol. A.*, 2004, vol. 22, no. 4, pp. 1361–1370. <http://dx.doi.org/10.1116/1.1688364>
- [8] S. Ramamurthy, “Low temperature spike anneal for NiSi”, *Solid State Technology*, 2004, vol. 10, pp. 37–39. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2004.07.048>
- [9] Zhihui Liu *et al.*, “The preliminary exploration on change mechanism of Seebeck coefficient for NiCr/NiSi thin film thermocouple with different thickness”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 931, 167573 p., – ISSN 0925-8388. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167573>
- [10] Sunil Babu Eadi *et al.*, “NiSiTb alloy interlayer properties at NiSi/Si junctions for improving thermal stability and contact resistance”, *Microelectronic Engineering*, 2021, vol. 236, 111482 p., ISSN 0167-9317. DOI: 10.1016/j.mee.2020.111482
- [11] Munir H. Nayfeh and Ammar Nayfeh, “Chapter 6 – Nanoparticle-assisted growth of nanowires”, Editor(s): In *Micro and Nano Technologies, Integrated Silicon-Metal Systems At the Nanoscale*, Elsevier, 2023, pp. 129–151, ISBN 9780443186738. DOI: 10.1016/B978-0-443-18673-8.00007-7
- [12] Ratnesh K. Pandey *et al.*, “New insights on Ni-Si system for microelectronics applications”, *Microelectronic Engineering*, 2022, vol. 264, 111871 p., ISSN 0167-9317. DOI: 10.1016/j.mee.2022.111871
- [13] Mike El Kousseifi *et al.*, “Nucleation and lateral growth kinetics of the NiSi phase at the epitaxial θ-Ni₂Si/Si interface”, *Acta Materialia*, 2020, vol. 198, pp. 100–110, ISSN 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.07.062
- [14] Jun & Qiu Luo *et al.*, “Interaction of NiSi with dopants for metallic source/drain applications”, *Journal of vacuum science & technology B*, 28, C111–C1111, 2010. DOI: 10.1116/1.3248267

- [15] Jianbao Gao *et al.*, “Dewetting of Ni silicide thin film on Si substrate: In-situ experimental study and phase-field modeling”, *Acta Materialia*, 2022, vol. 223, 117491 p., ISSN 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.117491
- [16] W. Huang *et al.*, “Effect of a thin W, Pt, Mo and Zr interlayer on the thermal stability and electrical characteristics of NiSi”, *Microelectronic Engineering*, 2007, vol. 84, pp. 678–683. DOI: 10.1016/j.mee.2006.11.006
- [17] W. Huang *et al.*, “The improvements of thermal stability of nickel silicide by adding the Zr interlayer”, *Microelectronic Engineering*, 2006, vol. 83, pp. 345–350.
- [18] J.F. Liu *et al.*, “Improvement of the thermal stability of NiSi films by using a thin Pt interlayer”, *Appl. Phys., Lett.* 2, October 2000, vol. 77, no. 14, pp. 2177–2179. DOI: 10.1063/1.1313815
- [19] M. Lemang *et al.*, “Redistribution of phosphorus during NiPtSi formation on in-situ doped Si”, *Microelectronic Engineering*, 2018, vol. 202, pp. 25–30, ISSN 0167-9317. DOI: 10.1016/j.mee.2018.10.005
- [20] K. Houmuda *et al.*, “Effect of Pt addition on Ni silicide formation at low temperature: Growth, redistribution, and solubility”, *Journal of Applied Physics*, 15 September 2009, vol. 106, no. 6, 063511 p. DOI: 10.1063/1.3204948
- [21] R. Mezouar *et al.*, “Effect of Vacuum Annealing Temperature on the Binary System Ni/Si(100)”, *Journal of nano- and electronic*, 2020, vol. 12, no 6, pp. 06005-106005-5. [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06005](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.12(6).06005)
- [22] O. Cojocaru-Mirădin *et al.*, “Snowplow effect and reactive diffusion in the Pt doped Ni–Si system”, *Scripta Materialia*, 2007, vol. 57, is. 5, pp. 373–376, ISSN 1359-6462. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.05.007

L.S. Levchuk, R.A. Shkarban, T.I. Verbytska, Yu.M. Makogon

FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE STRESS STATE ON THE THERMAL STABILITY OF THE NISI PHASE IN NI(Pt)/SI FILM

Background. It is possible to increase the speed the degree of integration of microcircuits and their reliable operation due to the use of thermostable nanoscale films of transition metal silicides as functional elements. Stress in nanostructures is a general problem of microelectronics, which must be taken into account at all stages of production, storage and operation of both discrete devices and integrated circuits.

Objective. The purpose of the paper is to study of the effect of stress state and Pt alloying element on the phase composition and thermal stability of NiSi nickel monosilicide in nanoscale [(Ni + 1 at. % Pt) 30 nm] and [(Ni + 8 at. % Pt) 30 nm] films on single crystalline Si(001) substrates during vacuum annealing in the temperature range of 400 °C – 1000 °C.

Methods. Nanoscale films were deposited by magnetron sputtering on Si(001) substrates at room temperature. The samples were annealed in a vacuum of $\sim 1.3 \cdot 10^{-3}$ Pa in the temperature range of 400 °C – 1000 °C. The influence of Pt on the change in stress state and the thermal stability of the NiSi phase in Ni(Pt) films on a single crystalline Si(001) substrate was investigated using the methods of X-ray structural phase analysis, mass spectrometry of secondary neutrals, and resistometry (four-probe method).

Results. The influence of internal mechanical stresses and the content of the Pt alloying element in the film on the sequence, temperature of silicide phases formation, and thermal stability of NiSi nickel monosilicide during vacuum annealing was determined.

Conclusions. It was established that adding Pt to the Ni film leads to an increase in the nickel monosilicide formation temperature compared to the Ni (30 nm) film.

Nickel monosilicide NiSi begins to form in films with 1 at. % Pt and 8 at. % Pt during annealing at temperatures of 500 °C and 450 °C, respectively. An increase in the thermal stability of NiSi is associated with a significant decrease in the driving force of the NiSi into NiSi₂ phase transition due to the formation of a Ni_xPt_{1-x}Si solid solution, which has a lower free energy, due to the positive contribution of the $T \cdot \Delta S$.

Keywords: stressed state; NiSi; phase composition; nanoscale films; annealing; vacuum.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового інституту матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
13 лютого 2024 року

Прийнята до публікації
10 лютого 2025 року