

ВПЛИВ ІОННОГО БОМБАРДУВАННЯ І ШОРСТКОСТІ ВИХІДНОЇ ПОВЕРХНІ НА ОПТИЧНІ ПАРАМЕТРИ АМОΡФНИХ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ

В.Д. Карпуша, У.С. Швець
Сумський державний університет
Україна

Надійшла до редакції 05.01.2013

У роботі досліджувався вплив бомбардування низькоенергетичними іонами аргону на оптичні властивості аморфних металевих сплавів $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ та $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ в діапазоні довжин хвиль волн $\lambda = 500 \cdot 10^{-6} - 1250 \cdot 10^{-6}$ м. У результаті еліпсометричних вимірювань та вирішення оберненої задачі еліпсометрії встановлені оптичні характеристики сплавів. Показано, що бомбардування поверхні аморфних сплавів низькоенергетичними іонами призводить до зменшення оптичної товщини поверхневого шару. Виявлено, що “підкладки” різних за первинним станом поверхонь після полірування мають, практично, однакові показники поглинання і заломлення.

Ключові слова: аморфний металевий сплав, еліпсометрія, оптичні властивості, низькоенергетичне іонне опромінення.

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ БОМБАДИРОВКИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ИСХОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АМОΡФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

В. Д. Карпуша, У. С. Швець

В работе исследовалось влияние бомбардировки низкоэнергетическими ионами аргона на оптические свойства аморфных металлических сплавов $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ и $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ в диапазоне длин волн $\lambda = 500 \cdot 10^{-6} - 1250 \cdot 10^{-6}$ м. В результате эллипсометрических измерений и решения обратной задачи эллипсометрии установлены оптические характеристики сплавов. Показано, что бомбардировка поверхности аморфных сплавов низкоэнергетичными ионами приводит к уменьшению оптической толщины поверхностного слоя. Выведено, что “подложки”, различные по первичному состоянию поверхностей, после полировки имеют, практически, одинаковые показатели поглощения и преломления.

Ключевые слова: аморфный металлический сплав, эллипсометрия, оптические свойства, низкоэнергетическое ионное облучение.

INFLUENCE OF ION BOMBARDMENT AND INITIAL SURFACE ROUGHNESS ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF AMORPHOUS METAL ALLOYS

V. D. Karpusha, U.S. Shvets

In the present work the influence of bombardment of low energy argon ions on optical properties of metal alloys $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ and $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ has been investigated in the range of wavelengths from $\lambda = 500 \cdot 10^{-6}$ to $\lambda = 1250 \cdot 10^{-6}$ m. On the basis of ellipsometric measurements and inverse ellipsometry problem solution the alloys optical characteristics have been determined. It is shown that, bombardment of the amorphous alloys by low energy ions leads to decrease in optical thickness of the surface layer. It is found, that “substrates” having different surfaces after polishing have the same reflection and refraction indices.

Key words: amorphous metal layer, ellipsometry, optical properties, low-energy ion irradiation.

ВСТУП

Властивості аморфних тіл пов'язані зі структурними, хімічними, фізичними та термодинамічними особливостями [1 – 3]. Проте опис цих матеріалів виявляється складнішим у порівнянні з кристалічним станом і рідиною. Як наслідок цього, багато задач, які досліджують властивості аморфного стану, до цього часу не отримали однозначного вирішення і залишаються актуальними.

Відомо, що аморфні тіла при температурі 18 °С можуть зберігати свої фізичні властивості протягом від 10 тис. до 100 тис. років [4], але вони не знаходяться у стані метастабільної рівноваги [5]. За певних зовнішніх умов відбувається перехід, що супроводжується зміною фізичних властивостей [6, 7]. Зовнішні впливи, такі як опромінювання частинками різної природи [8 – 11], кріообробка

[12, 13] та інші змінюють структуру зразка і, як наслідок, його властивості.

У науковому і прикладному аспектах важливим є виготовлення поверхонь із заздалегідь заданими параметрами. Однак наявність хімічної та структурної неоднорідностей у аморфних сплавах, що обумовлено зміною концентрації окремих атомів та надлишкового вільного об'єму, термічною нестабільністю, істотно впливає на експериментальні результати під час досліджень поверхневих явищ. У технологічних процесах велику роль відіграє стан поверхні зразка, який створюється поліруванням та іншими методами очищення [14]. Проте після механічної обробки на поверхні зразка завжди існує дефектний шар, глибина якого відповідає розмірам зерна абразиву і утвореним тріщинам. Видалення цього шару методом низькоенергетичної іонної обробки дозволяє отримувати поверхні, наближені за складом, структурою і властивостями до матеріалу об'єму [15 – 18]. Однак такого роду зовнішній вплив створює у поверхневому шарі так званий “змінений шар”. При цьому важливим залишається, щоб очищення не впливало на фізико-хімічний стан досліджуваних об'єктів, тому актуальні аналіз і неруйнівний контроль його параметрів.

Ефективним методом експериментального дослідження структури аморфних металевих сплавів є оптичний метод, зокрема еліпсометричні вимірювання [19 – 21]. Принциповою перевагою цього методу над енергетичними є висока чутливість вимірювань амплітудно-фазових співвідношень поля світлових хвиль, які взаємодіють із середовищем оптичної системи, а також безконтактність. При наявності зв'язку атомно-електронної структури аморфних сплавів з їх оптичними властивостями, з'являється можливість дослідження поверхневих шарів, об'ємних характеристик усього сплаву в цілому [22, 23].

Метою цієї роботи є дослідження впливу іонного бомбардування і шорсткості вихідної поверхні на оптичні характеристики аморфних сплавів.

УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі досліджувалися зразки аморфних металевих сплавів (АМС) $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{50}\text{B}_{10}$,

$\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, отримані методом спінінгування розплаву зі швидкістю охолодження $V = 10^6$ К/с. Такий процес характеризується різним станом боків стрічки: контактної з диском (внутрішньої, матової) та зовнішньої (контактуючою з атмосферою, блискучою). Для отримання дзеркальної поверхні зразків застосовувалося механічне полірування з використанням паст типу АСМ. Багатокомпонентні сплави були представлені у вигляді стрічок товщиною $40 \cdot 10^{-6}$ м і шириною $2 \cdot 10^{-2}$ м.

Бомбардування поверхні здійснювалося іонами спектрально чистого аргону. Енергія іонів становила декілька десятків електрон-вольт. Еліпсометричні вимірювання досліджуваних поверхонь проводилися після охолодження зразка, підданого бомбардуванню, протягом 15 хв. в атмосфері аргону. Для експериментальної перевірки впливу бомбардування поверхні АМС іонами інертного газу в аномально тліючому розряді на оптичні властивості застосовувались режими: *A* – час бомбардування 1 хв.; *B* – 3 хв.; *C* – 5 хв.

Для визначення оптичних параметрів аморфних сплавів використовувався спектро-еліпсометричний метод Біті-Кона при куті падіння світла $\varphi_0 = 72^\circ$ у діапазоні довжин хвиль волн $\lambda = 500 \cdot 10^{-6} - 1250 \cdot 10^{-6}$ м.

Оптичні характеристики досліджуваних зразків (коефіцієнт заломлення n_1 і поглинання k_1 поверхневого шару, коефіцієнт заломлення n_2 і поглинання k_2 підкладки, оптична товщина d поверхневого шару) отримані для моделі “тонка однорідна плівка – однорідна підкладка”. В якості однієї з характеристик поверхневого шару, що обумовлено його хімічної та структурною неоднорідностями, було використано поняття оптичної товщини, фізичний сенс якого полягає в тому, що її значення визначає поверхневий шар, де оптичні властивості суттєво відрізняються від властивостей матеріалу в цілому.

Значення оптичних параметрів сплавів були отримані у результаті розв'язання оберненої задачі еліпсометрії. За наближене рішення приймався такий елемент (n_1, k_1, n_2, k_2, d) з безлічі заздалегідь обмеженого підкласу можливих рішень, на якому нев'язка цільової функції F досягала свого мінімального значення [24]:

$$F = \sum \left[\left(\Delta_i^c - \Delta_i^m \right)^2 + \left(\psi_i^c - \psi_i^m \right)^2 \right] \rightarrow \min ,$$

де Δ_i^c, ψ_i^c – розраховані на основі даної моделі еліпсометричні кути; Δ_i^m, ψ_i^m – еліпсометричні кути, експериментально отримані методом Біті-Кона.

Розраховані оптичні характеристики в досліджуваному діапазоні довжин хвиль були апроксимовані лінійними залежностями методом найменших квадратів.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати еліпсометричних досліджень аморфних сплавів $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ та $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ (рис. 1) показали, що бомбардування поверхні низькоенергетичними іонами приводить до зменшення значень оптичної товщини d поверхневого шару. Видно, що зміна і стабілізація цієї характеристики у процесі бомбардування відбувається протягом перших 3-х хвилин, подальше збільшення часу впливу змін не викликає.

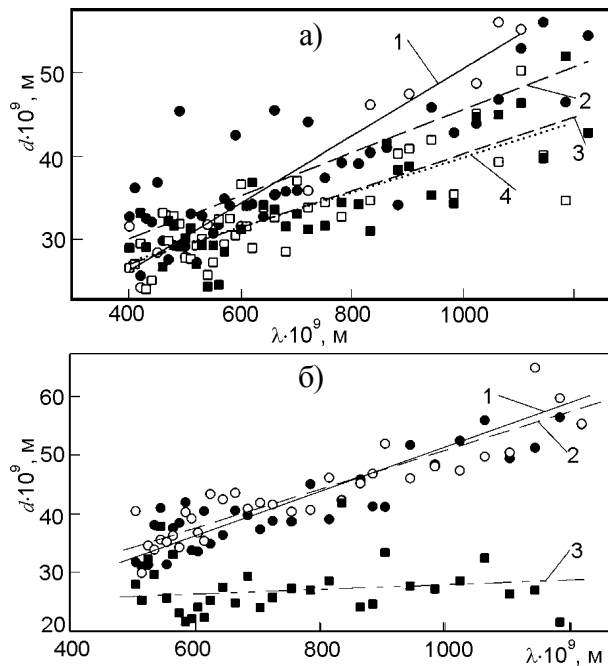


Рис. 1. Спектральні залежності оптичної товщини d поверхневого шару до і після бомбардування аморфних сплавів $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ (а) (о – 1 – вихідний зразок, ● – 2 – режим А, □ – 3 – режим В, – 4 – режим С) та $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ (б) (о – 1 – матова поверхня вихідного зразка, ● – 2 – блискуча поверхня вихідного зразка, – 3 – після бомбардування).

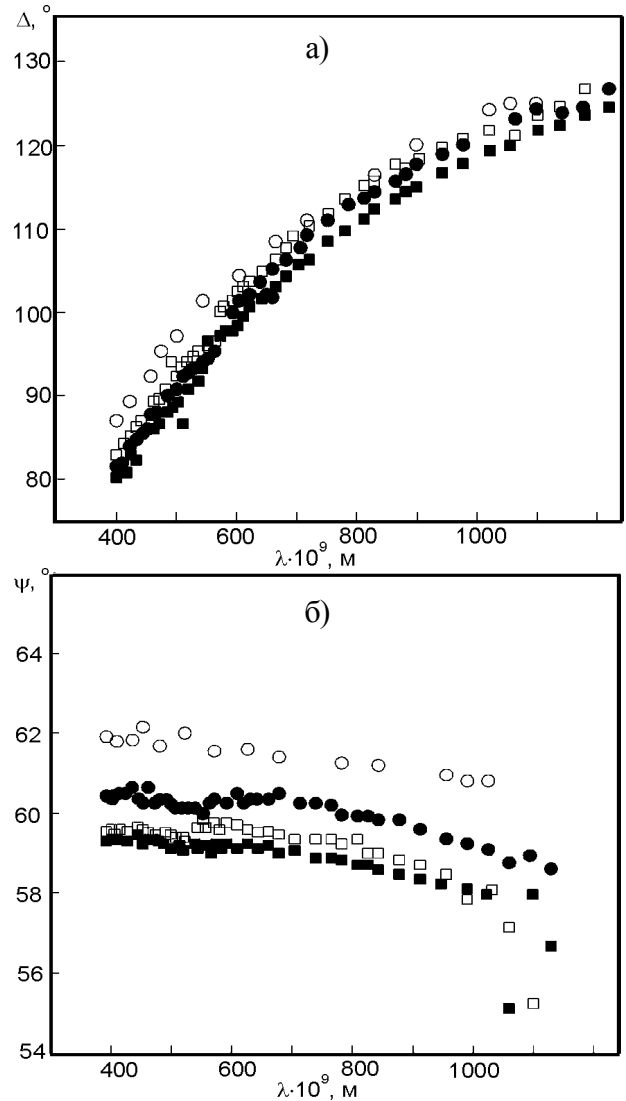
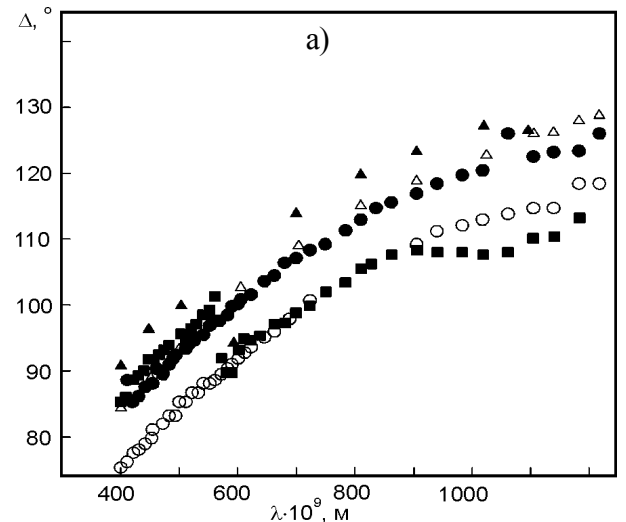


Рис. 2. Спектральні залежності еліпсометричних кутів аморфного металевго сплаву $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ до і після бомбардування (о – вихідний зразок, ● – режим А, □ – режим В, ≈ – режим С).

На рис. 2, 3 наведені спектральні залежності величин еліпсометричних кутів Δ та ψ досліджуваних зразків. Встановлено, що от-



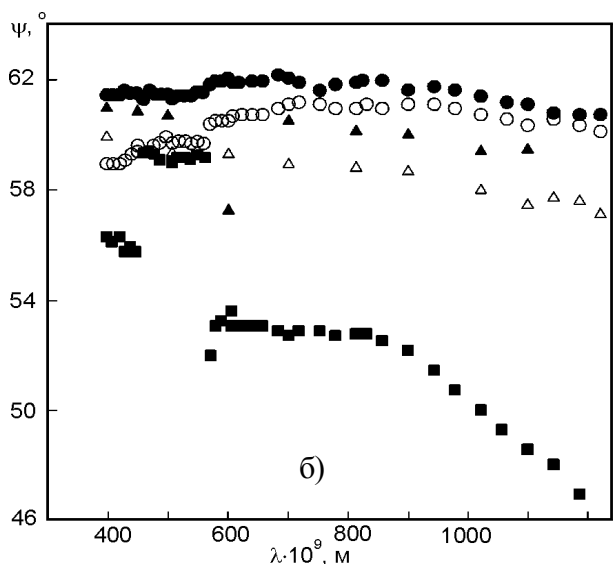


Рис. 3. Спектральні залежності еліпсометричних кутів аморфного металевого сплаву $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ до і після бомбардування (o – матова, • – блискуча, \approx – після бомбардування, \blacktriangle – полірована блискуча, \triangle – полірована матова поверхні).

римані спектральні залежності зсуву фаз Δ між p - та s -компонентами еліпса поляризації для аморфного сплаву $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ (рис. 2а) практично збігаються; дещо більший розкид вони мають для сплаву $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ (рис. 3а). Проте для обох випадків залишається характерним розміщення залежностей для бомбардованого зразка нижче по відношенню до вихідного. Тобто бомбардування в аномальногліючому розряді приводить до зменшення значень Δ .

Аналіз спектральних залежностей азимуту відновленої лінійної поляризації ψ показав (рис. 2б, 3б), що полірування поверхні та її бомбардування викликає також і зменшення значень ψ . Через те, що саме цей еліпсометричний параметр у першу чергу реагує на зміну шорсткості [25], проведені дослідження дозволяють зробити висновок про зменшення шорсткості поверхні в результаті її бомбардування.

Із еліпсометричних обчислень можна зробити висновок, що товщина інформативного шару d залежить від якості поверхні. Так величини d матової поверхні мають більші значення, ніж у блискучої (рис. 4а, б). Утворення поверхонь з меншою шорсткістю (у результаті полірування матової і блискучої поверхонь) приводить до того, що апроксимуючі лінії спектральних залежностей $d = f(\lambda)$ (рис. 4в, г) розташовані на графіках нижче.

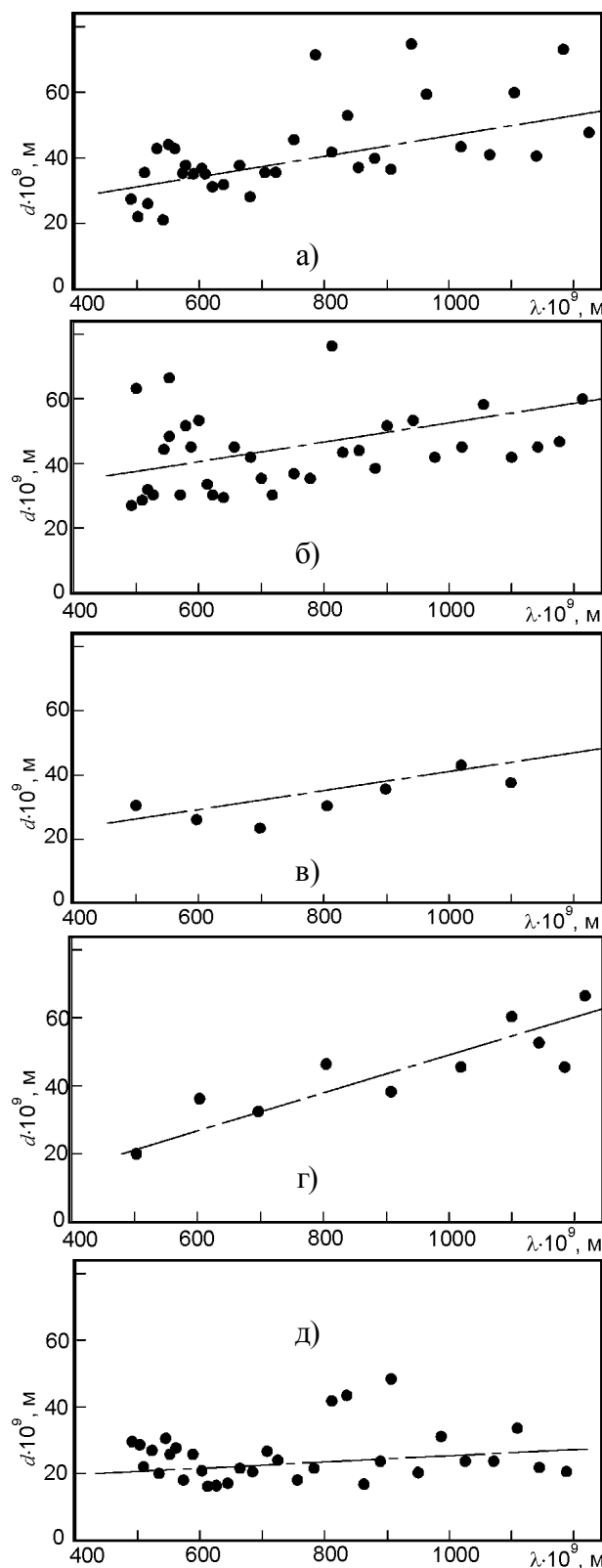


Рис. 4. Спектральні залежності оптичної товщини d товщини блискучої (а), матової (б), полірованих блискучої (в) та матової (г), бомбардованої (д) поверхонь аморфного сплаву $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$.

Бомбардування поверхні низькоенергетичними іонами аргону також сприяє зменшенню її шорсткості і змінює оптичні властивості по-

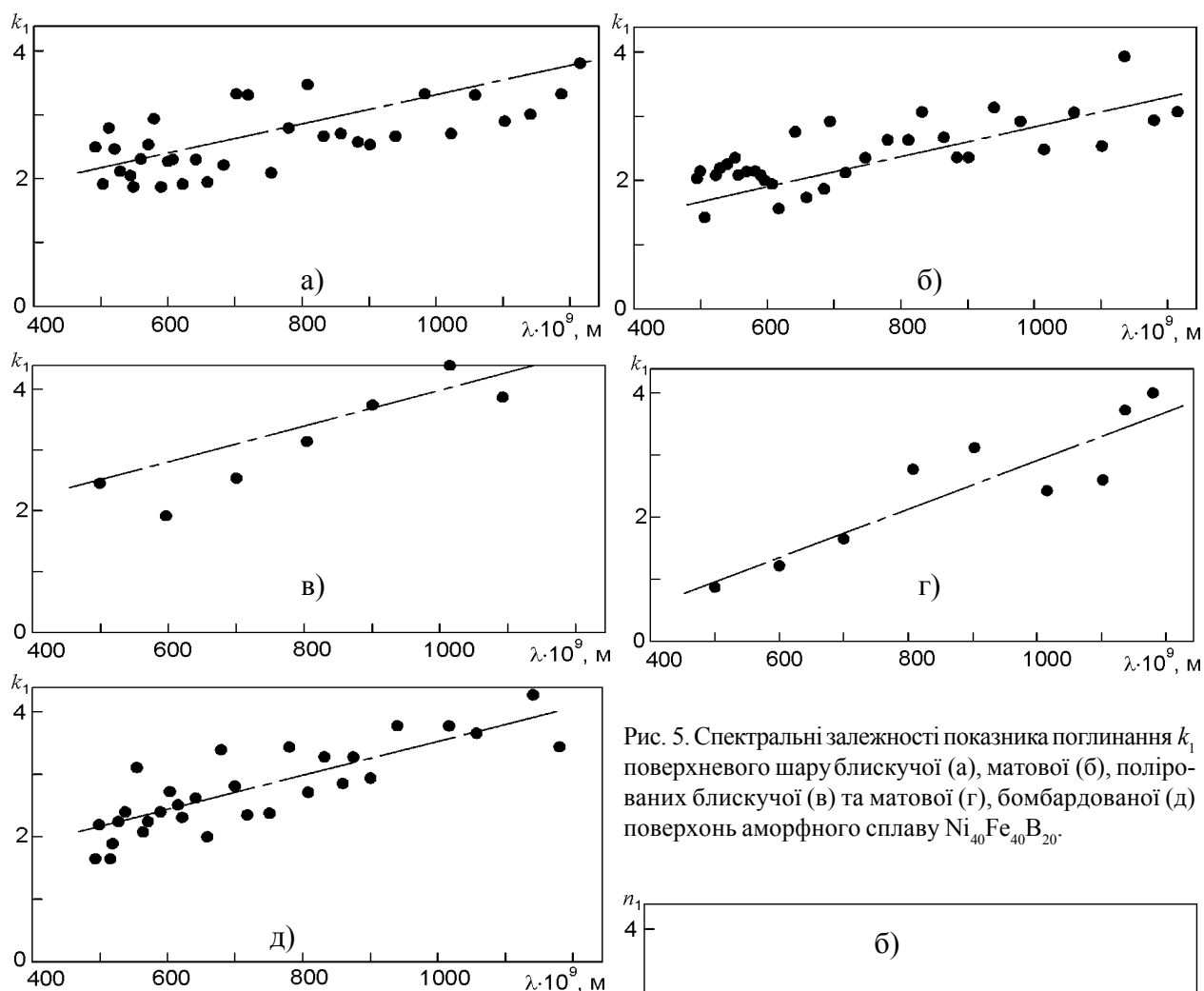
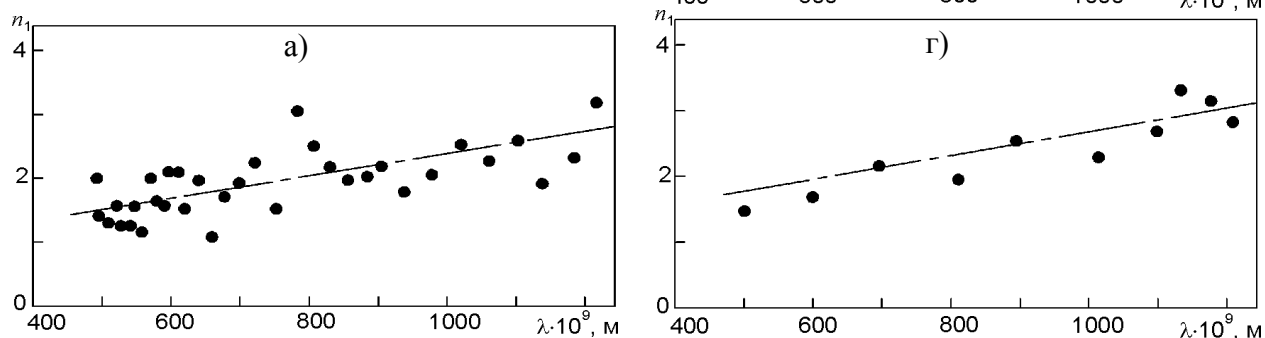


Рис. 5. Спектральні залежності показника поглинання k_1 поверхневого шару блискучої (а), матової (б), полірованих блискучої (в) та матової (г), бомбардованої (д) поверхонь аморфного сплаву $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$.

верхнього шару (рис. 4д). Кут нахилу лінії апроксимації спектральної залежності у порівнянні з полірованими поверхнями (рис. 4в, г) зменшується.

Показники поглинання поверхневого шару k_1 різних за фізичним станом поверхонь у досліджуваному діапазоні довжин хвиль майже не відрізняються (рис. 5). Проте значення k_1 для матової поверхні дещо менші (рис. 5б), де очевидно знижується щільність оптичного шару за рахунок включення повітря при збільшенні шорсткості, а значення k_1 для полірованої блискучої поверхні (рис. 5в) –



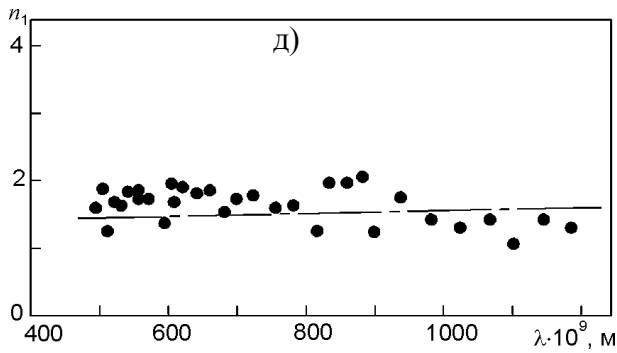


Рис. 6. Спектральні залежності показника заломлення n_1 поверхневого шару блискучої (а), матової (б), полірованих блискучої (в) та матової (г), бомбардованої (д) поверхонь аморфного сплаву $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$.

більші через підвищення щільності оптичного шару. Це повністю співпадає і з висновком про різну товщину оптичного шару матової і блискучої поверхонь (див. рис. 4а, б).

Показник заломлення поверхневого шару n_1 матової і блискучої поверхонь (рис. 6а, б) змінюється з однаковою інтенсивністю із зростанням λ . Оскільки щільність поверхневого шару блискучої поверхні вища, апроксимуюча лінія залежностей $n_1 = f(\lambda)$ блискучої поверхні проходить вище, ніж у матової. В результаті бомбардування товщина інформативного шару майже не змінюється в досліджуваному діапазоні хвиль (рис. 4д) і це аналогічним чином відбивається на його показнику заломлення (рис. 6д). Кут нахилу апроксимуючої прямої залежності $n_1 = f(\lambda)$ менший ніж до бомбардування.

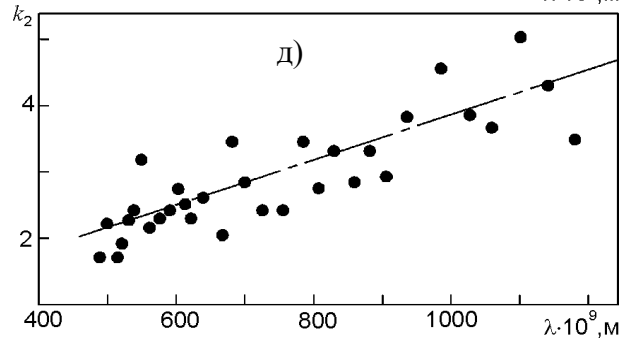
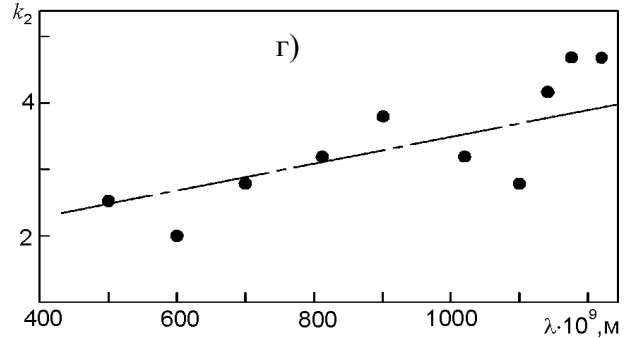
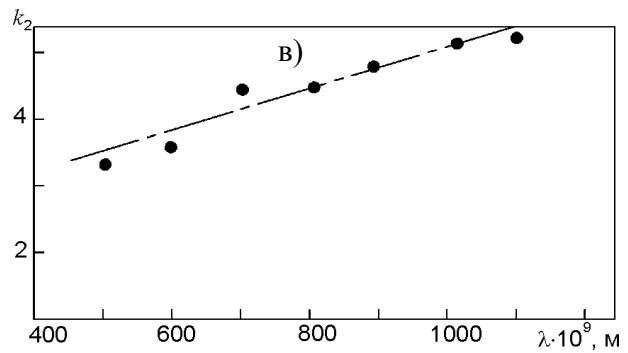
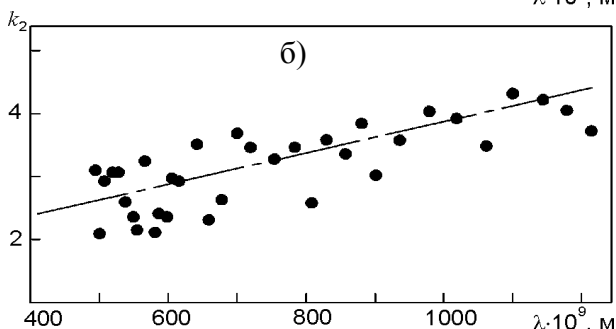
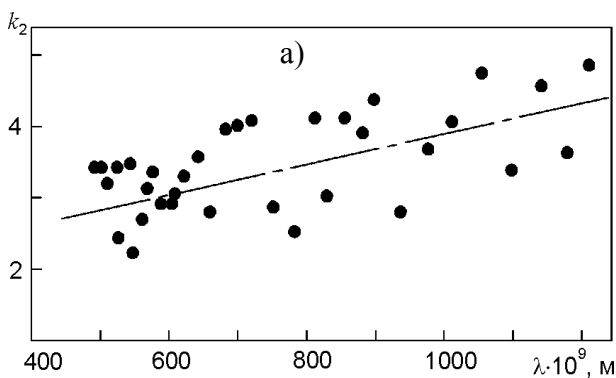
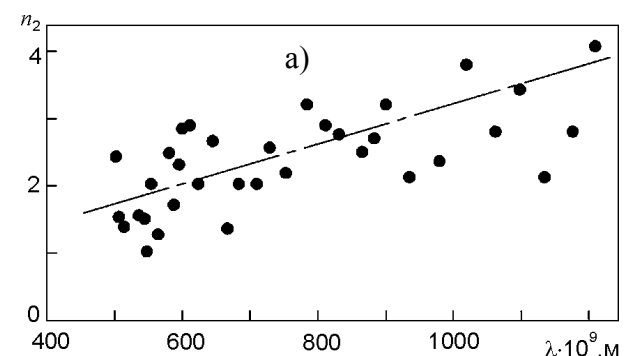


Рис. 7. Спектральні залежності показника поглинання k_2 “підкладки” блискучої (а), матової (б), полірованих блискучої (в) та матової (г), бомбардованої (д) поверхонь аморфного сплаву $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$.

Аналіз спектральних залежностей показника поглинання “підкладки” k_2 показав, що сплави, з різними за первинним станом поверхнями, після полірування мають подібні показники поглинання (рис. 7в, г). Виходячи з того, що оптичні властивості матеріалу під поверхневим шаром залежать переважно від його атомно-електронної структури, показник поглинання “підкладки” повинен бути незмін-



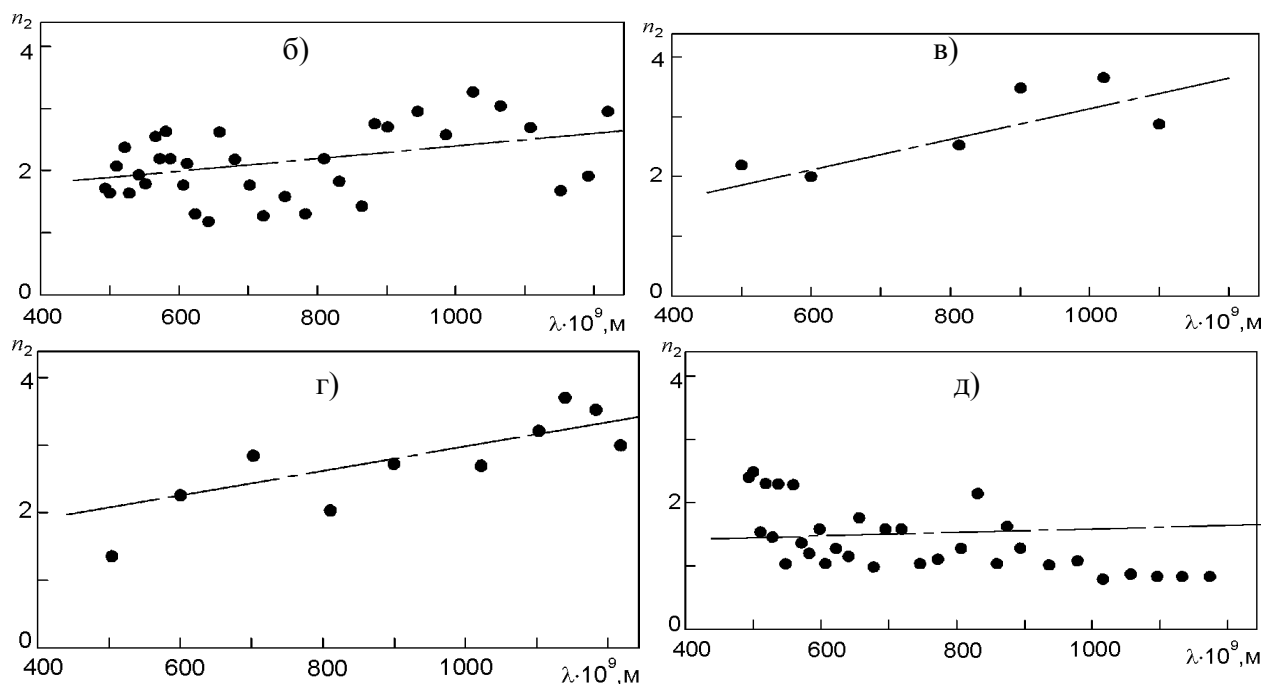


Рис. 8. Спектральні залежності показника заломлення n_2 “підкладки” блискучої (а), матової (б), полірованих блискучої (в) та матової (г), бомбардованої (д) поверхонь аморфного сплаву $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$.

ним. Це і підтверджується результатами експерименту (рис. 7).

Показники заломлення “підкладки” n_2 при дослідженні матової і блискучої поверхонь після їх полірування практично збігаються. При цьому лінії апроксимації залежностей $n_2 = f(\lambda)$ у координатах (n_2, λ) мають однакові положення (рис. 8в, г). Процес бомбардування поверхні в досліджуваному діапазоні хвиль викликає не тільки зменшення оптичної товщини інформативного шару d та показника заломлення n_1 , але й показника заломлення “підкладки” n_2 . Так, кут нахилу лінії апроксимації залежності $n_2 = f(\lambda)$ незначний (рис. 8д). Кут нахилу лінії апроксимації для блискучої поверхні більший, ніж для матової (рис. 8а, б).

ВИСНОВКИ

1. Бомбардування поверхні аморфних сплавів $Ni_{40}Fe_{50}B_{10}$ і $Ni_{40}Fe_{40}B_{20}$ низькоенергетичними іонами аргону приводить до зменшення значень оптичної товщини поверхневого шару.

2. Стабілізація еліпсометричних параметрів поверхні у процесі її бомбардування відбувається протягом перших 3 хвилин, збільшення часу взаємодії низькоенергетичних іонів з поверхнею подальших змін не викликає.

3. “Підкладки” різних за первинним станом поверхонь після полірування зразків мають, практично, однакові показники поглинання і заломлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Немошкаленко В.В., Романова А.В., Ильинский А.Г. Аморфные металлические сплавы. – К.: Наукова думка, 1987. – 248 с.
2. Судзуки К., Фудзимори К., Хасимото К. Аморфные металлы/под. ред. проф. Ц. Масумото. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
3. Аморфные металлические сплавы/Под ред. Ф.Е. Люборского. – М.: Металлургия, 1987. – 584 с.
4. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. Аморфные металлические сплавы//УФН. – 1990. – Т. 160, №. 9. – С. 75-110.
5. Золотухин И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 176 с.
6. Кекало И.Б., Жданов А.Н., Цветков В.Ю. Влияние упругой и пластической деформации на магнитные свойства аморфных сплавов//Сб. Структура, структурные превращения и магнитные свойства аморфных металлических сплавов.– М.: Металлургия, 1986.– С. 118-130.
7. Федоров В.А., Ушаков И.В. Влияние отжига на изменение характера деформирования и разрушения металлического стекла при локальном нагружении//ЖТФ. – 2001. – Т. 71, №. 6. – С. 28-31.

8. Пивоваров А.Л., Ченакин С.П., Черепин В.Т. Новая метастабильная структура в аморфном сплаве Fe₈₅B₁₅ после ионной бомбардировки//Письма в ЖТФ. – 1989. – Т 50, № 10. – С. 420-421.
9. Поздеев С.В., Дубровська Г.М., Поздеева О.В. Дослідження впливу фізико-механічних факторів при інтерпретації еліпсометричних вимірювань для скла К-8 після електронно-променевої обробки//ФХТТ. – 2001. – Т. 2, № 2. – С. 305-310.
10. Поперенко Л.В., Носач Д.В., Юргелевич І.В. Вплив тривалого нейтронного опромінення на оптичні властивості аморфного сплаву в інфрачервоній області//Sensor. Electr. Microsc. Techn. – 2011. – Т. 2 (8) № 2. – С. 27-31.
11. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц//ФИП. – 2003. – Т. 1, № 2. – С. 108-136.
12. Dokukin M.E., Perov N.S., Beskrovnyi A.I., et al. Structural relaxation of amorphous metallic alloys//J. Magn. Magn. Mat. – 2004. – Vol. 272-276S. – P. E1151-E1152.
13. Zaichenko S., Radkovskaya A., Sivov A., et al. Influence of boundary conditions on the parameters of the low-temperature DT effect//J. Magn. Magn. Mat.– 2003. – Vol. 258-259. – P. 567-570.
14. Куницкий Ю.А., Коржик В.Н., Борисов Ю.С. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике. – К.: Техника, 1988. – 198 с.
15. Черезова Л.А. Ионно-лучевые методы в оптической технологии. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
16. Попов В.М., Ю.М. Шустов, Клименко А.С., и др. Влияние облучения кремния низкоэнергетическими ионами аргона на образование в нем электрически активных дефектов//Материалы электроники.–2009.– № 4.– С. 48-51.
17. Белоус В.А., Лапшин В.И., Марченко И.Г., и др. Радиационные технологии модификации поверхности. I. Ионная очистка и высокодозовая имплантация//ФИП. – 2003. – Т. 1, №. 1. – С. 40-48.
18. Сафонов В.И., Марченко И.Г., Картмазов Г.Н., и др. Формирование приповерхностных слоев при низкоэнергетическом высокодозном ионно-плазменном облучении поверхности меди//ВАНТ.–2000.– № 4.– С. 182-184.
19. Швець У., Карпуша В. Еліпсометричні дослідження структурних змін аморфних сплавів унаслідок пластичної деформації//Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2008. – № 41. – С. 275-282.
20. Losurdo M., Bergmair M., Bruno G., et al. Spectroscopic ellipsometry and polarimetry for materials and systems analysis at the nanometer scale: state-of-the-art, potential, and perspectives //J. Nanopart. Res. – 2009. – Vol. 11, № 7. – P. 1521-1554.
21. Hilfiker J., Hale J., Johs B., Tiwald T., Synowicki R., Bungay C., Woollam J.A. Spectroscopic ellipsometry in optical coatings manufacturing// SVC 44th Annual Technical Conference Proceedings, (Philadelphia). – 2001. – P. 295-300.
22. Карпуша В.Д., Швець У.С. Взаимосвязь оптических свойств приповерхностных слоев и объемных характеристик аморфных сплавов //ФТТ. – 2007. – Т. 49, №. 3. – С. 465-467.
23. Ключев В.В., Матвеев В.И. Неразрушающий контроль и диагностика нанотехнологий и наноматериалов//Контроль. Диагностика. – 2007.– № 10. – С. 3-13.
24. Азам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. – 548 с.
25. Беляева А.И., Галуза А.А., Савченко А.А., и др. Влияние бомбардировки ионами дейтерия на морфологию и оптические свойства поверхности рекристаллизованного вольфрама//Уч. зап. Тавр. нац. ун. Сер. ф.-м. н. – 2010. – Т. 23 (62), №. 3. – С. 136-1487.

LITERATURA

1. Nemoshkalenko V.V., Romanova A.V., Pinskiy A.G. Amorfnye metallicheskie splavy. – К.: Naukova dumka, 1987. – 248 s.
2. Sudzuki K., Fudzimori K., Hasimoto K. Amorfnye metally/pod. red. prof. C. Masumoto. – М.: Metallurgiya, 1987. – 328 s.
3. Amorfnye metallicheskie splavy/Pod red. F.E. Lyuborskogo. – М.: Metallurgiya, 1987. – 584 s.
4. Zolotuhin I.V., Kalinin Yu.E. Amorfnye metallicheskie splavy//UFN. – 1990. – Т. 160, №. 9. – S. 75-110.
5. Zolotuhin I.V. Fizicheskie svojstva amorfnyh metallicheskih materialov. – М.: Metallurgiya, 1986. – 176 s.
6. Kekalo I.B., Zhdanov A.N., Cvetkov V.Yu. Vliyanie uprugoj i plasticheskoj deformacii na magnitnye svojstva amorfnyh splavov//Sb. Struktura, strukturnye prevrascheniya i magnitnye svojstva amorfnyh metallicheskih splavov. – М.: Metallurgiya, 1986. – S. 118-130.
7. Fedorov V.A., Ushakov I.V. Vliyanie otzhiga na izmenenie haraktera deformirovaniya i razru-

- sheniya metallichesкого стекла pri lokalnom nagruzhении//ZhTF.– 2001.– T. 71, № 6.– S. 28-31.
8. Pivovarov A.L., Chenakin S.P., Cherepin V.T. Novaya metastabil'naya struktura v amorfnom splave $Fe_{85}B_{15}$ posle ionnoj bombardirovki//Pisma v ZhTF. – 1989. – T 50, № 10. – S. 420-421.
 9. Pozdeev S.V., Dubrovskaya G.M., Pozdeeva O.V. Doslidzhennya vplivu fiziko-mehaničnih faktoriv pri interpretacii elipsometričnih vimiryuvan' dlya skla K-8 pislya elektronno-promenevoi obrobki//FHTT. – 2001. – T. 2, № 2. – S. 305-310.
 10. Poperenko L.V., Nosach D.V., Yurzevich I.V. Vpliv trivalogo nejtronnogo oprominennya na optični vlastivosti amorfnogo splavu v infracherovnij oblasti//Sensor. Electr. Micros. Techn. – 2011. – T. 2 (8) № 2. – S. 27-31.
 11. Pogrebnyak A.D., Kulmenteva O.P. Strukturno-fazovye prevrascheniya v poverhnostnyh sloyah i svojstva metallicheskih materialov posle impulsnogo vozdejstviya puchkov chastic//FIP. – 2003. – T. 1, № 2. – S. 108-136.
 12. Dokukin M.E., Perov N.S., Beskrovnyi A.I., et. al. Structural relaxation of amorphous metallic alloys//J. Magn. Magn. Mat. – 2004. – Vol. 272-276S. – P. E1151-E1152.
 13. Zaichenko S., Radkovskaya A., Sivov A., et. al. Influence of boundary conditions on the parameters of the low-temperature DT effect//J. Magn. Magn. Mat.– 2003.– Vol. 258-259. – P. 567-570.
 14. Kunickij Yu.A., Korzhik V.N., Borisov Yu.S. Nekristallicheskie metallicheskie materialy i pokrytiya v tehnike. – K.: Tehnika, 1988. – 198 s.
 15. Cherezova L.A. Ionno-luchevye metody v opticheskoj tehnologii. – SPb: SPbGU ITMO, 2007. – 151 s.
 16. Popov V.M., Yu.M. Shustov, Klimenko A.S., i dr. Vliyanie oblucheniya kremniya nizkoenergetičeskimi ionami argona na obrazovanie v nem elektricheski aktivnyh defektov//Materialy elektroniki. – 2009. – № 4. – S. 48-51.
 17. Belous V.A., Lapshin V.I., Marchenko I.G., i dr. Radiacionnye tehnologi modifikacii poverhnosti. I. Ionnyaya ochildka i vysokodozovaya implantaciya//FIP. – 2003. – T. 1, №. 1. – S. 40-48.
 18. Safonov V.I., Marchenko I.G., Kartmazov G.N., i dr. Formirovanie pripoverhnostnyh sloev pri nizkoenergetičeskom vysokodoznom ionno-plazmennom obluchenii poverhnosti medi//VANT. – 2000. – № 4. – C. 182-184.
 19. Shvec U., Karpusha V. Elipsometrični doslidzhennya strukturnih zmin amorfnih splaviv unasilidok plastichnoji deformacii//Visnik Lvivskogo universitetu. Seriya fizichna. – 2008. – № 41. – S. 275-282.
 20. Losurdo M., Bergmair M., Bruno G., et. al. Spectroscopic ellipsometry and polarimetry for materials and systems analysis at the nanometer scale: state-of-the-art, potential, and perspectives//J. Nanopart. Res. – 2009. – Vol. 11, № 7. – P. 1521-1554.
 21. Hilfiker J., Hale J., Johs B., Tiwald T., Synowicki R., Bungay C., Woollam J.A. Spectroscopic ellipsometry in optical coatings manufacturing//SVC 44th Annual Technical Conference Proceedings, (Philadelphia). – 2001. – P. 295-300.
 22. Karpusha V.D., Shvec U.S. Vzaimosvyaz optičeskih svojstv pripoverhnostnyh sloev i obemnyh harakteristik amorfnih splavov//FTT. – 2007. – T. 49, №. 3. – S. 465-467.
 23. Klyuev V.V., Matveev V.I. Nerazrushayuschij kontrol i diagnostika nanotehnologij i anomaterialov//Kontrol'. Diagnostika. – 2007. – № 10. – S. 3-13.
 24. Azam R., Bashara N. Ellipsometriya i polyarizovannyj svet. – M.: Mir, 1981. – 548 s.
 25. Belyaeva A.I., Galuza A.A., Savchenko A.A., i dr. Vliyanie bombardirovki ionami dejteriya na morfologiyu i optičeskie svojstva poverhnosti rekristallizirovannogo volframa//Uch. zap. Tavriac. un. Ser. f.-m. n. – 2010. – T. 23 (62), №. 3. – S. 136-1487.