

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 535.34

ВПЛИВ ТРИВАЛОГО НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АМОРФНОГО СПЛАВУ $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ В ІНФРАЧЕРВОНІЙ ОБЛАСТІ

Л. В. Поперенко, Д. В. Носач, І. В. Юргелевич

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет,
вул. Володимирська, 64, Київ 01601, Україна, plv@univ.kiev.ua, yurgel@univ.kiev.ua

ВПЛИВ ТРИВАЛОГО НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АМОРФНОГО СПЛАВУ $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ В ІНФРАЧЕРВОНІЙ ОБЛАСТІ

Л. В. Поперенко, Д. В. Носач, І. В. Юргелевич

Анотація. Досліджено вплив тривалого нейтронного опромінення на оптичні властивості аморфного металевого сплаву $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ в інфрачервоній області $\nu=400-5000\text{ см}^{-1}$ методом спектральної еліпсометрії. Встановлено, що поведінка діелектричної проникності стрічок $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ в ІЧ області не може бути описана друдеподібними залежностями після нейтронного опромінення. Зміни оптичних сталих сплаву $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ пов'язані з частковим зняттям напруг у поверхневому шарі стрічок, тобто формуванням більш однорідної структури сплаву.

Ключові слова: оптичні властивості, еліпсометрія, аморфний сплав, нейтронне опромінення

INFLUENCE OF LONG-TERM NEUTRON IRRADIATION ON OPTICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ ALLOY IN INFRARED

L. V. Poperenko, D. V. Nosach, I. V. Yurglevych

Abstract. The influence of the long-term neutron irradiation on optical properties of the amorphous metallic $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ alloy in the infrared $\nu=400-5000\text{ cm}^{-1}$ was investigated by spectral ellipsometry. It was found that dependence of dielectric function differs from Drude-like one in the infrared after neutron irradiation. The change of optical constants of the $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ alloy is connected with partial removal of pressure in the surface layer of ribbons, that is formation of more homogeneous structure of the alloy.

Keywords: optical properties, ellipsometry, amorphous alloy, neutron irradiation

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНОГО СПЛАВА $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ

Л. В. Поперенко, Д. В. Носач, И. В. Юргелевич

Аннотация. Исследовано влияние длительного нейтронного облучения на оптические свойства аморфного металлического сплава $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ в инфракрасной области $\nu=400-5000$ cm^{-1} методом спектральной эллипсометрии. Установлено, что поведение диэлектрической проницаемости лент $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ в ИК области не может быть описана друдеподобными зависимостями после нейтронного облучения. Изменение оптических постоянных сплава $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ связано с частичным снятием напряжений в поверхностном слое лент, то есть формированием более однородной структуры сплава.

Ключевые слова: оптические свойства, эллипсометрия, аморфный сплав, нейтронное облучение

Вступ

Наибольш застосовними методами отримання неупорядкованих металевих матеріалів є методи гартування із металевого розплаву, оскільки вони дозволяють виготовляти стрічки, металеві порошки та тонкий дріт [1]. Стрічки аморфних металевих сплавів (АМС), виготовлені методом спінінгування розплаву (гартуванням на диску, що обертається), за технологією їх створення є метастабільними та знаходяться в пружно-напруженому стані після їх отримання. Опромінення різними частинками таких матеріалів може призводити до активації процесів структурної релаксації в приповерхневому шарі за рахунок його розігріву джоулевим теплом. Тому такі аморфні структури можна використовувати в якості своєрідного детектора (чи сенсора), наприклад, при їх опроміненні нейтронами. Для ефективного використання аморфних матеріалів у будь-якій системі детектування необхідним є з'ясування умов модифікації структури їх поверхневого шару внаслідок нейтронного опромінення.

Добре відомо [2], що для зразків металевого скла після опромінення їх швидкими нейтронами у ядерному реакторі відбувається розбухання матеріалу, тобто зменшується його густина, що може суттєво позначитися на рівні залишкових напруг матеріалу. У цьому випадку енергія та потік складають відповідно 0.1 МеВ та $2.2 \cdot 10^{13}$ нейтронів/($cm^2 \cdot c$). Проте, можна очікувати певних змін у атомній структурі аморфних стрічок при їх опроміненні і низькоенергетичними нейтронами, якщо опромінення є досить тривалим.

Відгук неупорядкованої металевої системи на оптичне збудження додатково характеризує особливості перебудови її атомної структури та електронного енергетичного спектру поблизу рівня Фермі внаслідок структурної релаксації. Метою даного дослідження було з'ясування спектроеліпсометричним методом зміни оптичних характеристик поверхонь аморфного металевого сплаву $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ в інфрачервоній області після тривалого опромінення низькоенергетичними нейтронами.

Методика експерименту

Аморфні металеві сплави $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ у вигляді стрічок шириною 10 мм були виготовлені із перегрітого до різних температур над точкою плавлення розплаву, а саме із розплаву з температурами $T_p=1250, 1350$ та 1600 $^{\circ}C$. Оптичні властивості зразків АМС вивчали після їх опромінення протягом тривалого часу (~12 годин) низькоенергетичними нейтронами від імпульсного джерела на установці LAD (ISIS, Оксфордшир, Великобританія). Енергія та потік складала відповідно ~1 меВ та $7 \cdot 10^{11}$ нейтронів/($cm^2 \cdot c$). Вимірювання виконували як для поверхні стрічки, яка була у контакті з диском-охолоджувачем при гартуванні (контактна поверхня), так і для поверхні, яка залишалась вільною в процесі виготовлення (неконтактна поверхня).

Для відокремлення вкладу поверхневих шорсткостей у оптичний відгук всієї системи атомів на поверхні ці АМС досліджували методом атомно-силової мікроскопії (АСМ). Оскільки за даними атомно-силової мікроскопії (АСМ) шорсткість контактної та неконтактної по-

верхонь була різною, то перед вимірюванням оптичних властивостей, з кожної поверхні стрічки було видалено шар полірування алмазними пастами з розміром зерен, що не перевищував 1 мкм. Подальші дослідження АСМ продемонстрували, що після такого двостороннього полірування параметри шорсткості на обох поверхнях відрізняються слабо, а також шорсткості є ненапрямленими.

При дослідженні оптичних властивостей АМС в інфрачервоній (ІЧ) області (частоти $\nu=400-5000 \text{ см}^{-1}$, а довжини хвиль $\lambda=2-25 \text{ мкм}$) застосовувався еліпсометр, спряжений з Фур'є — спектрометром IFS-55 Bruker. За такої методики експерименту [3] спершу після Фур'є перетворення отримували частотні залежності інтенсивностей відбитого від зразка світла при чотирьох положеннях аналізатора, I_0 , I_{45} , I_{90} , I_{-45} . Потім на їх основі розраховували частотні залежності еліпсометричних параметрів (зсуву фаз Δ між р- та s- компонентами еліпса поляризації та тангенса азимута $\text{tg}\psi$ відновленої лінійної поляризації) відбитого від поверхні світла. Потім отримували частотні залежності оптичних параметрів: показників заломлення n та поглинання k , дійсної ε_1 та уявної ε_2 частин діелектричної проникності, коефіцієнта відбивання R , зв'язок яких з еліпсометричними параметрами у моделі безплівкового напівнескінченного відбивального середовища [4] має вигляд:

$$n^2 - k^2 = \sin^2 \phi \left[1 + \text{tg}^2 \phi \frac{\cos^2 2\psi - \sin^2 2\psi \sin^2 \Delta}{(1 + \sin 2\psi \cos \Delta)^2} \right], \quad (1)$$

$$2nk = \sin^2 \phi \text{tg}^2 \phi \frac{\sin 4\psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\psi \cos \Delta)^2}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2, \quad \varepsilon_2 = 2nk, \quad (3)$$

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (4)$$

Результати та їх обговорення

Розраховані за формулами (1), (2) та (4) значення показників заломлення n та поглинання k і коефіцієнта відбивання R при нормальному падінні світла в ІЧ області частот $400-5000 \text{ см}^{-1}$ аморфного металевго сплаву $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, загартованого із розплаву при температурах $T_p=1250, 1350$ та $1600 \text{ }^\circ\text{C}$, до та після нейтронного опромінення наведені у табл.1 та табл.2 відповідно. Оптичні параметри n , k та R зменшуються при

зростанні частоти ν світла для АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ до нейтронного опромінення при всіх температурах розплаву. До того ж коефіцієнт відбивання R в цій області частот приймає досить великі значення ($\sim 0.8-0.9$). Після тривалого опромінення низькоенергетичними нейтронами від імпульсного джерела АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ поведінка показника заломлення та коефіцієнта відбивання залишається тією ж самою, проте їх абсолютні величини значно зменшуються (R приблизно у 1.4 рази). А поведінка показника поглинання АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ після нейтронного опромінення стає протилежною, тобто він зростає при збільшенні частоти світла, причому його абсолютні величини також зменшуються в дослідженій ІЧ області частот.

Відомо [5], що до тонких змін електронної структури АМС внаслідок модифікації атомної структури чутливими є спектральні залежності діелектричної проникності саме у ІЧ області спектру. З метою дослідження можливих змін у атомно-електронній структурі АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ внаслідок тривалого нейтронного опромінення за формулами (3) розраховували дійсну ε_1 та уявну ε_2 частини діелектричної проникності, спектральні залежності яких для аморфного металевго сплаву $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, загартованого із розплаву при температурі 1600°C , наведені на рисунку 1. Для інших температур T_p спостерігаються подібні залежності $\varepsilon_1(\nu)$ та $\varepsilon_2(\nu)$. Залежності $\varepsilon_1(\nu)$ та $\varepsilon_2(\nu)$ для металів та металевих сплавів у ІЧ області спектра можуть бути описані у підході Друде-Зінера [6], якщо вклад міжзонних переходів є достатньо малим. Тоді функції $f_1(\omega^2)$, $f_2(\lambda)$ та $f_3(\lambda)$ повинні бути лінійними:

$$f_1(\omega^2) = \frac{1}{1 - \varepsilon_1} = \frac{\omega^2}{\Omega^2} + \frac{\gamma^2}{\Omega^2}, \quad f_2(\lambda) = \frac{\varepsilon_2}{1 - \varepsilon_1} = \frac{\gamma}{2\pi c} \lambda, \\ f_3(\lambda) = \sqrt{\frac{(1 - \varepsilon_1)^2 + \varepsilon_2^2}{1 - \varepsilon_1}} = \frac{\Omega}{2\pi c} \lambda, \quad (5)$$

де ε_1 та ε_2 — дійсна та уявна частини комплексної діелектричної проникності, розрахованої у наближенні напівнескінченного середовища; Ω та γ — плазмова та релаксаційна частоти відповідно.

Встановлено, що спектральна поведінка оптичних характеристик АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, загартованого із розплаву при температурах $1250, 1350$ та 1600°C , до нейтронного опромінення в ІЧ області є друдеподібною. Але після тривалого

Таблиця 1

Значення оптичних параметрів (показника заломлення n , показника поглинання k та коефіцієнта відбиття R при нормальному падінні світла) в ІЧ області частот 400-5000 см^{-1} аморфного металевого сплаву $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ до нейтронного опромінення.

Частота світла ν , см^{-1}	Температура розплаву T_p , °C								
	1250			1350			1600		
	n	k	R	n	k	R	n	k	R
401.13	19.00	26.77	0.93	18.91	36.39	0.96	15.41	27.41	0.94
501.41	20.64	24.96	0.92	18.47	31.10	0.94	14.02	26.48	0.94
601.7	18.00	22.78	0.92	15.87	27.21	0.94	12.53	23.98	0.93
701.98	16.96	20.92	0.91	15.26	24.40	0.93	11.93	21.93	0.93
802.26	15.89	19.57	0.90	14.55	22.55	0.92	11.18	20.47	0.92
902.54	14.97	18.43	0.90	13.63	20.97	0.92	10.41	19.15	0.92
1002.8	13.47	16.98	0.89	12.48	19.12	0.91	9.55	17.22	0.91
1500.4	11.49	13.85	0.87	10.84	14.97	0.88	7.42	13.70	0.88
2001.8	9.51	11.82	0.85	9.05	12.56	0.86	6.40	11.95	0.87
2503.2	8.56	10.50	0.83	8.15	11.09	0.84	5.71	10.47	0.85
3000.8	7.92	9.52	0.81	7.57	9.99	0.82	5.21	9.25	0.83
3502.2	7.27	8.79	0.80	6.94	9.16	0.81	4.71	8.30	0.81
4003.6	6.62	8.37	0.79	6.31	8.62	0.80	4.18	7.81	0.81
4501.1	6.12	7.91	0.78	5.84	8.06	0.79	3.77	7.23	0.80
4998.7	5.74	7.39	0.77	5.51	7.51	0.78	3.51	6.66	0.78

Таблиця 2

Значення оптичних параметрів (показника заломлення n , показника поглинання k та коефіцієнта відбиття R при нормальному падінні світла) в ІЧ області частот 400-5000 см^{-1} аморфного металевого сплаву $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ після нейтронного опромінення.

Частота світла ν , см^{-1}	Температура розплаву T_p , °C								
	1250			1350			1600		
	n	k	R	n	k	R	n	k	R
401.13	10.55	0.10	0.68	9.91	0.03	0.67	10.63	0.60	0.69
501.41	9.86	0.85	0.67	9.80	0.77	0.66	10.06	1.42	0.68
601.7	9.61	1.24	0.66	9.51	1.16	0.66	9.66	1.80	0.67
701.98	9.33	1.49	0.66	9.24	1.43	0.65	9.36	2.05	0.66
802.26	9.10	1.62	0.65	9.05	1.59	0.65	9.12	2.24	0.66
902.54	8.91	1.74	0.65	8.85	1.73	0.65	8.89	2.38	0.66
1002.8	8.60	1.97	0.64	8.59	1.92	0.64	8.54	2.57	0.65
1500.4	7.84	2.32	0.62	7.82	2.30	0.62	7.69	2.97	0.64
2001.8	7.28	2.48	0.61	7.28	2.46	0.61	7.12	3.09	0.62
2503.2	6.91	2.50	0.60	6.92	2.49	0.60	6.76	3.08	0.61
3000.8	6.66	2.48	0.59	6.68	2.47	0.59	6.46	3.04	0.60
3502.2	6.46	2.52	0.58	6.48	2.50	0.58	6.20	3.06	0.59
4003.6	6.33	2.64	0.58	6.35	2.61	0.58	5.85	3.30	0.59
4501.1	6.13	2.77	0.58	6.15	2.74	0.58	5.72	3.36	0.60
4998.7	5.88	2.82	0.57	5.93	2.79	0.57	5.40	3.40	0.59

опромінення низькоенергетичними нейтронами від імпульсного джерела АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ спектральна поведінка його оптичних характеристик змінюється і стає відмінною від друдеподібної в ІЧ області для всіх температур розплаву.

У спектральному інтервалі $\nu=400-5000 \text{ см}^{-1}$ також були виміряні еліпсометричні параметри Δ та $\text{tg}\Psi$ відбитого від поверхні стрічок АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ світла в залежності від її азиму-

тальної орієнтації у власній площині відносно s -напрямку. Отримано, що після нейтронного опромінення стрічки Δ змінюється у всьому спектральному інтервалі не більше, ніж на 2.5° , а $\text{tg}\Psi$ — на 0.1 при зміні кута повороту стрічки у межах $\alpha=0-135^\circ$. Зміни еліпсометричних параметрів подібного порядку були отримані для декількох кутів падіння ($\varphi=65, 70$ та 75°). Такі відхилення є малими і свідчать про те,

що після нейтронного опромінення пружно-напружений стан аморфної стрічки релаксує, хоча напруги повністю не зникають.

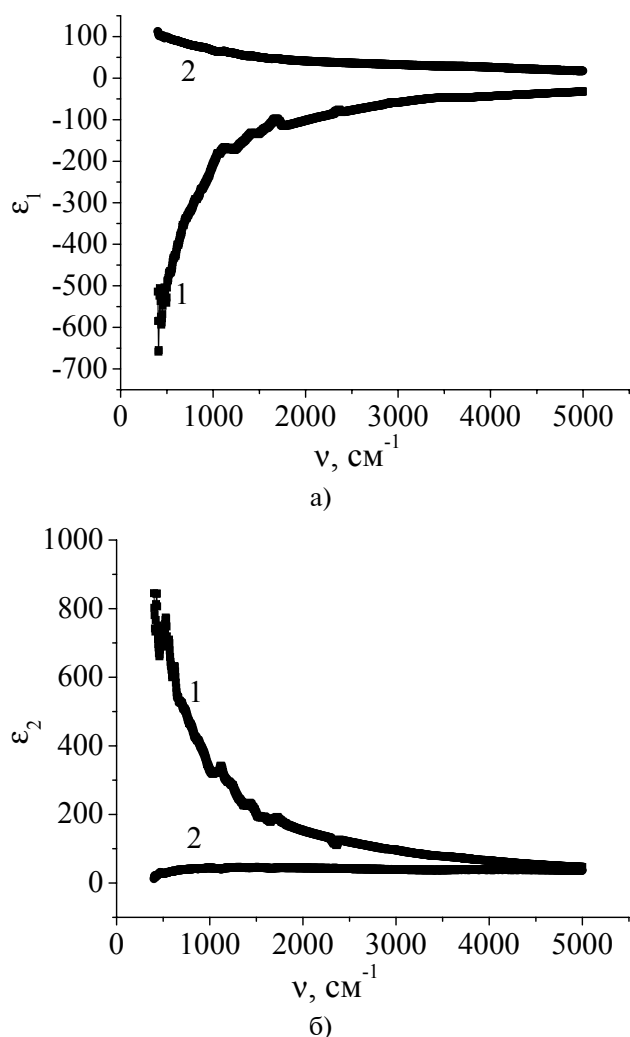


Рис.1. Спектральні залежності дійсної ϵ_1 (а) та уявної ϵ_2 (б) частин діелектричної проникності аморфного металевго сплаву $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, загартованого із розплаву при температурі 1600°C , виміряні для неконтактної поверхні стрічки до (криві 1) та після (криві 2) нейтронного опромінення

Отримані зміни оптичних властивостей АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, загартованого із розплаву при температурах 1250 , 1350 та 1600°C , у ІЧ спектральній області після тривалого нейтронного опромінення можуть бути пов'язані з тим, що металеві стрічки залишались у напруженому стані після загартування із розплаву, а тривале опромінення нейтронами призвело лише до часткового зняття внутрішніх напруг матеріалу без утворення областей кристалізації та змін шорсткості поверхні, тобто до формування більш однорідної структури АМС. Тому отриману відмінність у поведінці залежностей $\epsilon_1(\nu)$

та $\epsilon_2(\nu)$ до та після нейтронного опромінення можна пояснити специфічними особливостями динамічних характеристик електронів провідності з енергією Фермі в середовищі, і зокрема тим, що в більш розупорядкованій структурі для опису оптичних властивостей АМС потрібно враховувати ефекти слабкої локалізації андерсонівського типу для цих електронів.

Висновки

1. В ІЧ спектральній області $\nu=400-5000 \text{ cm}^{-1}$ отримано зменшення показників заломлення n та поглинання k і коефіцієнта відбивання R при нормальному падінні світла аморфного металевго сплаву $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, загартованого із розплаву при температурах 1250 , 1350 та 1600°C , після його тривалого опромінення низькоенергетичними нейтронами (енергія $\sim 1 \text{ MeV}$, потік $\sim 7 \cdot 10^{11}$ нейтронів/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{с})$, час ~ 12 годин) від імпульсного джерела.

2. З'ясовано, що після тривалого нейтронного опромінення спектральна залежність дійсної ϵ_1 та уявної ϵ_2 частин комплексної діелектричної проникності АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ в ІЧ області стає відмінною від друдеподібної.

3. Зміна оптичних та електронних властивостей АМС $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ пов'язана з викликаню тривалим опроміненням нейтронами структурною релаксацією АМС, тобто з частковим зняттям внутрішніх напруг матеріалу без утворення областей кристалізації та зміни шорсткості поверхні.

Список літератури

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы: Пер. с япон. — М.: Металлургия, 1987. — 328 с.
2. Gerling R., Schimansky F.P., Wagner R. Two-stage embrittlement of amorphous $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ resulting from a loss of free volume and phase separation // Acta Metal. — 1985. — Vol. 36, № 3. — P. 575–583.
3. Roeseler F. Infrared Spectroscopic Ellipsometry. — Berlin: Akademie-Verlag, 1990. — 160 p.
4. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет: Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. — 584 с.
5. Поперенко Л.В. Оптические свойства и электронная структура аморфных сплавов на основе элементов группы железа: Автореф. дис...д-ра физ.-мат. наук. — Киев. — 1992. — 38 с.
6. Соколов А.В. Оптические свойства металлов. — М.: Физматгиз, 1961. — 464 с.