

УДК 535.347.621

С.В. Поздєєв, Г.М. Дубровська*, О.В. Поздєєва
**Дослідження впливу фізико-механічних факторів при
інтерпретації еліпсометричних вимірювань для скла К-8
після електронно-променевої обробки**

*С.В. Поздєєв, Г.М. Дубровська *, О.В. Поздєєва
Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля
м. Черкаси 18034 Онопрієнка 8 тел. черг. част. (0472) 47-65-36 вн. АТС 2-77,
*Черкаський інженерно-технологічний інститут
м. Черкаси 18006 бульвар Шевченка 460, тел (0472) 43-36-80*

Обговорюються проблеми сучасної технології електронно-променевої обробки підкладок з оптичного скла. Для дослідження впливу електронно-променевої обробки застосовується еліпсометричний метод.

Досліджено вплив оптичної анізотропії, що наведена механічними напруженнями, та мікрорельєфу у поверхневих шарах підкладок зі скла К-8 після електронно-променевої обробки на еліпсометричні параметри. Розроблена методика дозволяє проводити попередній розрахунок впливу мікронапружень у поверхневому шарі. Проведення чисельного експерименту виявило що напруження у поверхневих шарах скла К-8 не впливають на результати еліпсометричних вимірювань. Вплив мікрорельєфу поверхні є значним і повинен враховуватись. Середньоквадратична висота нерівностей відповідає якісній обробці.

Ключові слова: оптичне скло, поверхневі шари, електронно променева обробка, оптична анізотропія, світла, еліпсометрія.

Стаття постуила до редакції 19.02.2001; прийнята до друку 15.04.2001

Дана робота є продовженням досліджень оптичних властивостей поверхневих шарів оптичного скла, після електронно-променевої обробки. У попередніх публікаціях [1] нами був розвинений підхід до вивчення поверхневих шарів за допомогою еліпсометричного методу із використанням декількох модельних уявлень їх структури. Всі ці моделі не цілком відповідали реальній будові поверхневих шарів, оскільки не враховували їх оптичну анізотропію, що викликана механічними напруженнями, та мікрорельєф поверхні. Впливом оптичної анізотропії було знехтувано, враховуючи експериментальні дослідження залежностей еліпсо-

метричних параметрів (Δ , ψ) від напруженого стану у склі К-8 [2]. Вказані дослідження показали, що збільшення напружень згину мало впливає на еліпсометричні параметри. Тим не менш, часто цей вплив є значним, і у кожному конкретному випадку потребує окремого дослідження [3]. Шорсткість поверхні теж є дуже впливовим фактором, який необхідно враховувати під час інтерпретації еліпсометричних вимірювань.

Метою даної роботи є виявлення залежності між напруженнями поверхневих шарів, що оброблене електронним опроміненням, і еліпсометричними параметрами. Такі залежності можна було б

використати для оцінки напруженого стану поверхневих шарів скла. Крім того, представляється цікавим, оцінити значення шорсткості поверхні і виявити її вплив на результати еліпсометричних вимірювань.

Аналіз літературних даних [4] вказує на те, що у результаті електронно-променевої обробки у поверхневих шарах формуються напруження, приблизна епюра яких приведена на рис. 1. Напруження у напрямках, що паралельні до поверхні розподілені однаково. У напрямку, що перпендикулярний до поверхні зразку напружень не виникає. Величина напружень залежить від режиму охолодження скла після обробки. При нормальному технологічному режимі охолодження величина максимальних напружень лежить

фотопружності на приладі ПКС 210 (ГОСТ 5.1831-73). Крім того, для оцінки впливу електронно-променевої обробки на інші властивості поверхневого шару скла були визначені його оптичні характеристики, вважаючи, що він однорідний і ізотропний. Результати вимірювань приведені у табл. 1.

Літературні дані [4] вказують на те, що напруження зростають, в основному, під час охолодження, і його режим визначає значення цих напружень. Дані, що наведені у таблиці свідчать про те, що напруження, які виникають у поверхневих шарах після електронно-променевої обробки мало залежать від її режиму, тоді як оптичні характеристики поверхневого шару, які не пов'язані з наявністю напружень, відчують значний вплив режиму обробки.

Таблиця 1.

Оптичні характеристики скла К-8, що оброблене електронним променем.

Режим обробки		Об'ємний коефіцієнт заломлення	Кут падіння	Поляризаційні кути			Коефіцієнт заломлення та оптична товщина поверхневого шару		Максимальна різниця ходу променів	Максимальні напруження у поверхневому шарі скла
U, кВ	I, мА	$n_{об}$	φ°	Δ°	ψ°	n_1	d, нм	δ , нм	МПа	
5.5	100	1.5147	50	178.8 67	10.2	1,495	62	287	6.9	
5.5	150	1.5147	50	178.6 1	9,05	1,492	50	437	10.5	
5.5	200	1.5147	50	177.4 7	8,62	1,497	61	275	6.6	
5.5	200	1.5147	45	1.02	18,23	1,499	77	367	8.8	
5.5	250	1.5147	50	1.01	10.6	1,304	149	275	6.6	
5.5	250	1.5147	50	1.03	9.5	1,382	105	262	6.3	

в межах 6-15 МПа. Таким чином, можна, використавши дану модель розподілення нормальних напружень, оцінити їх вплив на еліпсометричні параметри, вирішуючи пряму задачу еліпсометрії. Під час експериментального дослідження було проведено еліпсометричні вимірювання зразків що були оброблені електронним променем стрічкової форми під різними режимами.

Напруження, що виникали у поверхневому шарі оцінювались методами

Таким чином, можна припустити, що вплив оптичної анізотропії, яка наведена напруженнями, на еліпсометричні параметри є незначним.

Під час аналізу анізотропії відбивальної поверхні зручно скористатись наближеним рівнянням еліпсометрії анізотропних поверхневих шарів у вигляді [3]:

$$\rho = \rho_0(1 + A_p a_p - A_s a_s),$$

де ρ – відносний коефіцієнт відбивання реальної поверхні $\rho = \text{tg}\psi \cdot e^{i\Delta}$, Δ , ψ –

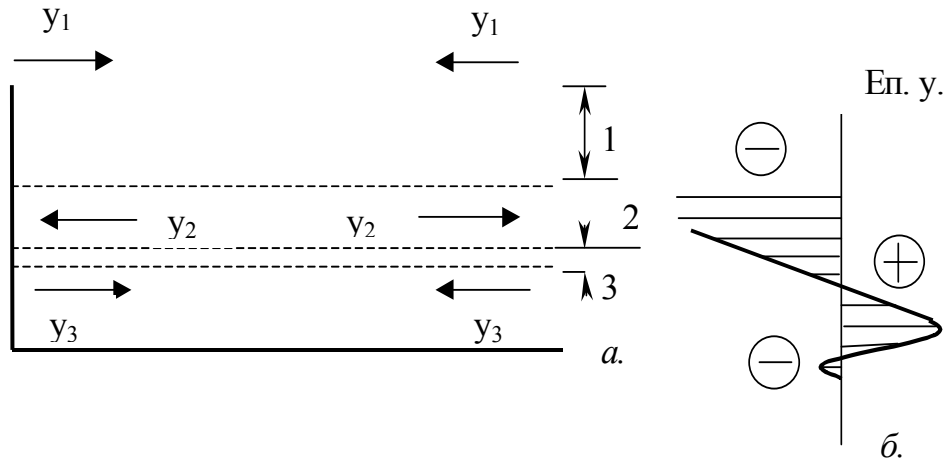


Рис 1. Шари плати, що модифікована ЕП (а) зі скла К-8, та епіюра напружень (б), які розподілені у перерізі плати
1 – 0.3-0.4 мм; 2 – 1.4-1.5 мм; 3 – 1.1-1.2 мм.

еліпсометричні параметри, ρ_0 – відносний коефіцієнт відбивання для різкої границі розділу двох середовищ, A_p , A_s , a_p , a_s –

коефіцієнти для р- та s- компонент електричного поля. Перелічені величини можна визначити за формулами:

$$\rho_0 = \frac{\sin^2 \varphi - \cos \varphi \sqrt{n_{об}^2 - \sin^2 \varphi}}{\sin^2 \varphi + \cos \varphi \sqrt{n_{об}^2 - \sin^2 \varphi}};$$

$$A_p = \frac{2\vartheta_{0,p} \cos \varphi}{\vartheta_{0,p}^2 - \cos^2(\varphi)}; A_s = \frac{2 \cos \varphi}{\cos^2 \varphi - \vartheta_{0,s}^2}, \vartheta_{0,p} = \frac{1}{\varepsilon_{0,x}} \left(1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\varepsilon_{0,z}}\right); \vartheta_{0,s} = \varepsilon_{0,y} - \sin^2 \varphi;$$

$$a_p = -\frac{ik_0}{\varepsilon_{0,x} \vartheta_{0,p}} \int_0^\infty \left[\varepsilon_x(z) - \varepsilon_{0,x} - \sin^2 \varphi \frac{(\varepsilon_x(z)\varepsilon_z(z) - \varepsilon_{0,x}\varepsilon_{0,z})}{\varepsilon_{0,z}\varepsilon_z(z)} \right] \exp(-i \cdot 2\vartheta_{0,p} k_0 \varepsilon_{0,x} z) dz;$$

$$a_s = -ik_0 \int_0^\infty (\varepsilon_y(z) - \varepsilon_{y,0}) \exp(-i \cdot 2k_0 \vartheta_{0,s} z) dz,$$

де $\varepsilon_{0,z}$, $\varepsilon_{0,y}$, $\varepsilon_{0,x}$ – діелектричні проникливості у напрямках осей координат (ХОZ – площина падіння випромінювання, Z – вісь, перпендикулярна до відбивальної поверхні), $n_{об}$ – коефіцієнт заломлення у шарі матеріалу, φ – кут падіння випромінювання лазера на поверхню зразка, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – довжина хвилі випромінювання лазера еліпсометра, i – уявна одиниця.

Приведене рівняння дозволяє розрахувати еліпсометричні параметри при відомому розподілі діелектричної проникливості по глибині поверхневого

шару скла.

Для оцінки впливу напружень, що виникають після електронно-променевої обробки, введемо модель оптично анізотропного поверхневого шару. Враховуючи експериментальні дані [4] введемо такі властивості моделі:

У напрямку, що перпендикулярний до поверхні зразка діелектрична проникливість скла не змінюється $\varepsilon_z(z) = \varepsilon$.

У будь-якому напрямку, що паралельний до поверхні зразка світлові хвилі розповсюджуються однаково $\varepsilon_x(z) = \varepsilon_y(z)$.

Діелектрична проникливість у напрямках, що паралельні до поверхні зразка змінюється за законом, що приведений на рис.2.

величини напружень.

З отриманих залежностей видно, що найбільш чутливим до наявності оптичної анізотропії у поверхневих шарах є

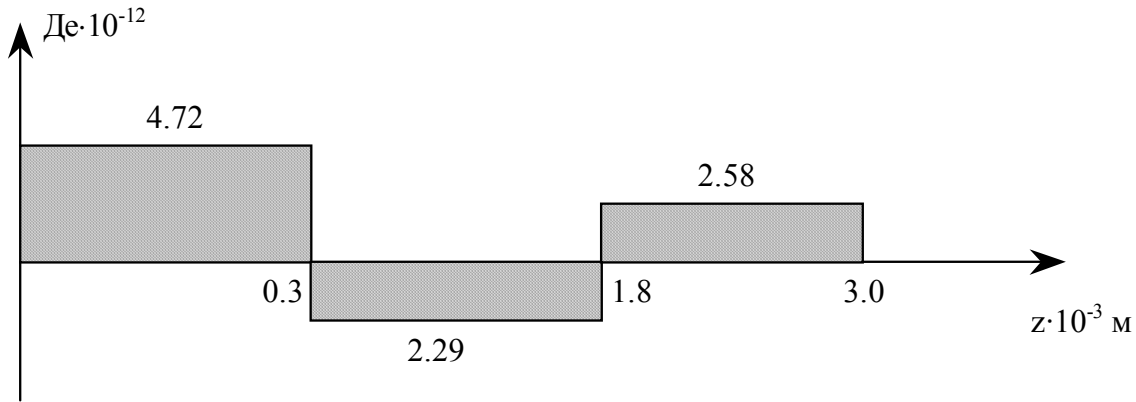


Рис. 2. Зміна діелектричної проникливості у поверхневому шарі одного із зразків.

З використанням цієї моделі був проведений чисельний експеримент, в результаті якого, був оцінений вплив оптичної анізотропії, що викликана напруженнями, на еліпсометричні параметри. Для розрахунків було використано результати експериментальних досліджень, отриманих в лабораторії ЕПО ЧІТІ що приведені в [4]. Всі розрахунки було проведено у програмному середовищі MATHCAD.

еліпсометричних параметр ψ . Параметр Δ майже не зазнає ніяких змін. В цілому, можна сказати, що оптична анізотропія, що викликана напруженнями у поверхневих шарах скла, дуже слабо впливає на еліпсометричні параметри, оскільки відхилення еліпсометричних параметрів лежить у межах експериментальної похибки. Такий самий результат було отримано і при експериментальних дослідженнях впливу напружень, що виникають внаслідок згинальної деформації

На рис.3 представлені залежності

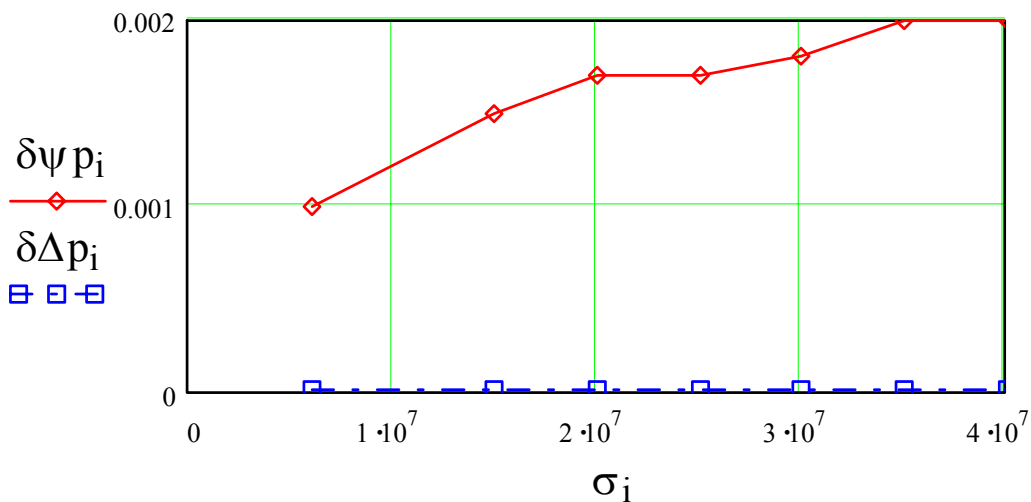


Рис. 3. Залежності відхилення поляризаційних кутів від поляризаційних кутів для різкої границі розділу середовищ від величини напружень у поверхневих шарах скла, що отримані у результаті чисельного експерименту.

відхилення еліпсометричних параметрів від скляних пластин, на еліпсометричні

параметри [2].

Під час інтерпретації еліпсометричних вимірювань з врахуванням шорсткості поверхні скла було використано рівняння зв'язку між еліпсометричними параметрами, характеристиками поверхневого шару і середньоквадратичною висотою нерівностей рельєфу поверхні у вигляді [3]:

$$\rho = \bar{\rho} \left[1 - 2kA_1 \int_0^{\infty} \Delta n(z) \exp(-i2p_0 z) dz + A_0 k^2 2p_0 \beta^2 \Delta n \right]$$

$$A_1 = A_0 \exp(-2k^2 \beta^2 \cos \varphi) \left[1 + \frac{R_{0s}(1+(1-2a)\bar{\rho})}{2A_0} \right] [1 - \exp(-4k^2 \beta^2 \cos \varphi)].$$

В цій формулі $a = (n_1/n_{06})^2 \sin^2 \varphi$, n_1 – коефіцієнт заломлення зовнішнього середовища, $R_{0s} = \frac{n_1 \cos \varphi - \sqrt{n_{06}^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi}}{n_1 \cos \varphi + \sqrt{n_{06}^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi}}$ – коефіцієнт Френеля для різкої гранці розділу середовищ s – компоненти електричного вектора.

де $\Delta n(z)$ – зміна значення показника заломлення по товщині поверхневого шару за певним модельним уявленням, Δn – різниця між показником заломлення середовища та показником заломлення матеріалу, β – середньоквадратична висота нерівностей мікрорельєфу поверхні, A_1 – коефіцієнт, що визначається за формулою:

приведені у таблиці 2.

Дані табл. 2 показують, що мікрорельєф поверхні є розвиненим, але відповідає якійсь обробці скла. Обидві моделі дають однакові результати і вказують на те, що при інтерпретації еліпсометричних вимірювань під час вивчення поверхні скла, яке було оброблене електронним

Таблиця 2.

Параметри поверхневого шару з врахуванням мікрорельєфу поверхні.

Експериментальні дані			Параметри поверхневого шару, що усереднені для трьох кутів падіння									
			Модель однорідного поверхневого шару (МОШ)					Модель неоднорідного поверхневого шару з лінійним профілем показника заломлення (МНШ)				
Кут падіння	Еліпсометричні параметри		Без врахування σ		З врахуванням σ			Без врахування σ		З врахуванням σ		
			n	$d, \text{нм}$	n	$d, \text{нм}$	$\sigma, \text{нм}$	n	$d, \text{нм}$	n	$d, \text{нм}$	$\sigma, \text{нм}$
φ°	Δ°	ψ°	n	$d, \text{нм}$	n	$d, \text{нм}$	$\sigma, \text{нм}$	n	$d, \text{нм}$	n	$d, \text{нм}$	$\sigma, \text{нм}$
50	179.049	9.282	1.498	120	1.467	120	77	1.495	140	1.459	134	85
60	1.261	6.245										
70	0.317	21.028										

В якості оптичної неоднорідності поверхні взяті дві найбільш адекватні моделі поверхневого шару [1]. У першій моделі показник заломлення лишається постійним у межах поверхневого шару, у другій він змінюється за лінійним законом. Використавши такий підхід, було отримано значення середньоквадратичної висоти нерівностей мікрорельєфу, отримані дані

опроміненню, необхідно враховувати вплив мікрорельєфу.

Таким чином, можна зазначити наступне:

Напруження, що виникають у поверхневих шарах скла, викликають в них оптичну анізотропію, яка практично не впливає на еліпсометричні параметри.

Під час еліпсометричних досліджень

оптичного скла, що оброблене електронним опроміненням, оптичною анізотропією поверхневих шарів можна знехтувати.

Застосована методика розрахунків впливу оптичної анізотропії може бути використана для його попередньої оцінки.

В результаті ЕПО підкладок з оптичного

скла на них відбувається утворення мікрорельєфу, який відповідає якісній поверхні.

Вплив мікрорельєфу поверхні на еліпсометричні параметри у даному випадку є значним і повинен враховуватись.

- [1] Поздеев С.В. Дубровська Г.М., Канашевич Г.В., Юрінець Р.В. Дослідження технологічної спадковості діелектричних матеріалів методом еліпсометрії після електронно-променевої обробки // *Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения. ДГТУ. 13*, с. 90 (2000).
- [2] Маслов В.П. и др. Исследование влияния упругих деформаций на эллипсометрические параметры поверхности полированных оптических стекол // *Поверхность, физика, химия, механика. 1*, с. 135(1989).
- [3] Пшеницын В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю. *Эллипсометрия в физико-химических исследованиях*. Л.: Химия, 1986. 152 с.
- [4] Канашевич Г.В. *Диссертация на соискание ученой степени к.т.н «Электронно-лучевая обработка поверхности плат оптических интегральных схем»*, Черкассы 1997.

S.V. Pozdeyev, G.N. Dubrovska, O.V. Pozdeyeva

Investigation of the Physics Mechanical Factors Influence at Interpretation of Ellipsometrical Measurements for a Glass K-8 after Electron Beam Processing

*Herous of Chornobylyj Cherkasy institute of fire security
Cherkasy 18034 Onoprienko Str., 8, tel.: (0472) 47-65-36,
*Cherkasy ingeneer-technology institute
Cherkasy 18006 Shevchenko Av. 460, tel.: (0472) 43-36-80*

The problems of the modern technology dealing with the electronic-beam processing of the substrates from optical glass are discussed. To investigate the influence of the electronic-beam processing the ellipsometrical method is used.

The influence of the optical anisotropy of surface layers induced by mechanical pressure and microrelief of a surface substrates made from a glass K-8 after electron beam processing on the ellipsometrical parameters is investigated. The developed technique allows to carry out precomputation of the micropressure influence in a surface layer. The undertaking of the computing experiment has shown that stress in the glass K-8 surface layers do not influence upon the results of the ellipsometrical measurements. The presence of a surface microrelief has a significant influence on the ellipsometrical parameters and it should be taken into account. Root-mean-square height of roughnesses complies with qualitative processing.