

УДК 535.016.

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2020/4.13>

Ямпольський А. Л.¹, асп.,
Макаренко О. В.², д.ф.-м.н., доц.

A. L. Yampolskiy¹, PhD stud.,
O. V. Makarenko². Dr. Sci.

Поляриметрия анізотропного поверхневого шару на склі

Polarimetry of anisotropic surface layer on glass

^{1,2}Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, м. Київ, вул. Володимирська 64/13,
¹uv365nm@ukr.net

^{1,2}Taras Shevchenko National University of Kyiv, 01601, Kyiv, Volodymyrska st. 64/13,
¹uv365nm@ukr.net

Досліджуючи вектор Стокса відбитого від поверхні оптичного скла світла, встановлено наявність анізотропного поверхневого шару. Виявлено різницю фаз між р- та s-компонентами випромінювання, яка змінюється в залежності від кута падіння. Оскільки анізотропний шар має підвищений показник заломлення внаслідок його механічної обробки, його можна розглядати як деякого приповерхневий хвилевід. Було досліджено можливість введення випромінювання у такий планарний хвилевід за допомогою призми. Перевірка показала порушення повного внутрішнього відбивання, неоднакове для р- та s-поляризації, що підтверджує наявність підповерхневого шару та його анізотропію.

Ключові слова: поляриметрия, неоднорідність, поверхневий шар, скло.

Investigating the Stokes vector of light reflected from the surface of the optical glass, the presence of an anisotropic surface layer was established. The phase difference between radiation p- and s-components is revealed, which varies depending on the angle of incidence. This shows a weak anisotropy. Assuming that the anisotropic layer has an increased refractive index due to its chemical-mechanical treatment, it can be considered as some near-surface weakly guiding gradient buried waveguide. The possibility of coming radiation into such a planar waveguide using a coupling total reflection prism was investigated. The inspection showed a violation of the total internal reflection, unequal for p- and s-polarizations, which confirms the presence of the subsurface layer and its anisotropy. The absorption of radiation, which could be compared with the excitation of modes, is small. This is due to the properties of the prism material. Also, higher order modes are absorbed better. There is no significant angular dependence of the polarization degree of the output beam; however, it is higher in the case of s-polarization.

Key Words: polarimetry, inhomogeneity, surface layer, glass.

Статтю представив д.ф.-м.н. Макарець М. В.

Вступ

Технологічна обробка діелектричних, зокрема, скляних поверхонь має велике значення у багатьох наукових і промислових галузях. Одержання якомога однорідніших інтерфейсів важливо, зокрема, у лазерній фізиці [1]. Разом з тим, відомо, що на поверхнях оптичних деталей через технологічні особливості завжди присутній тонкий поверхневий неоднорідний шар [2]. В деяких випадках, наприклад, створення елементів градієнтної оптики, безклеєве поєднання деталей оптичним контактом [3], роль подібних шарів може бути суттєвою і потребує врахування. У зв'язку з цим лишаються актуальними питання удосконалення технології,

а також забезпечення контролю та дослідження властивостей таких шарів.

В ідеалізованому випадку ідеально гладенької межі розділу ізотропних діелектричних середовищ зі співвідношень Френеля впливає, що різниця фаз між р- та s-компонентами взаємодіючого випромінювання не може відрізнитися від 0 або π . Це означає, що лінійно поляризоване випромінювання після відбивання залишиться лінійно поляризованим. В цьому випадку четвертий компонент його вектора Стокса повинен бути рівним нулю. Метою даної роботи стала демонстрація наявності на зразках скла поверхневого шару та дослідження його хвилеводних властивостей.

Експериментальна частина.

В якості зразків для дослідження було обрано чотири плоскопаралельні пластинки з кольорового скла. Це стандартні світлофільтри з оптичних стекол марок СС-1, СЗС-20, СЗС-24, БС-8. Вони відрізняються показниками заломлення і поглинання в обраній області спектру.

Експериментальна установка (рис. 1) побудована за схемою Стокс-поляриметра. Випромінювання від джерела 1 з довжиною хвилі $\lambda = 625$ нм проходить через поляризатор 2 і падає на зразок 3. Після відбивання промінь проходить крізь чверть хвильову пластинку 4 та аналізатор 5 і реєструється приймачем 6. Поляризатор 2 задає напрямок площини поляризації падаючого світла, а фазова пластинка 4 разом з аналізатором 5 обертаються за спеціальним алгоритмом, що дозволяє виміряти 4 компоненти вектора Стокса.

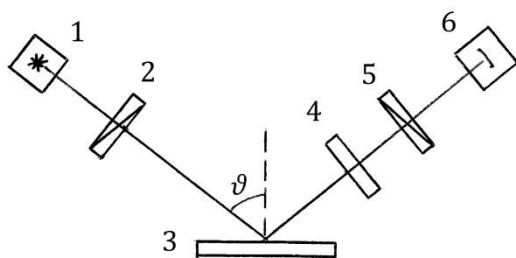


Рис. 1. Схема поляриметра. 1 – джерело випромінювання, 2 – поляризатор, 3 – зразок, 4 – компенсатор, 5 – аналізатор, 6 – приймач випромінювання.

Для збудження хвиль у порушеному шарі (якщо він здатний працювати як хвилевід) в цій схемі елемент 3 замінюється на зразок, притиснутий до грані скляної призми (рис. 2). Призма виконує роль контактного елемента. За відсутності зразка у ній відбувається повне внутрішнє відбивання, причому поблизу відбивальної поверхні (в області на відстані порядку довжини хвилі випромінювання) виникає неоднорідна хвиля. Якщо наблизити до відбивальної грані поверхню скла, яка містить неоднорідний шар (хвилевод) настільки, щоб край неоднорідної хвилі заходив у цей шар, тоді почнуть збуджуватися власні моди хвилеводу і частина енергії з падаючої хвилі буде перекачуватись у випромінювання, що поширюватиметься хвилеводом.

Показник заломлення використаної призми становить $n = 1,511$ в обраній частині спектру. Внутрішній кут падіння θ перераховується за законом Снеліуса.

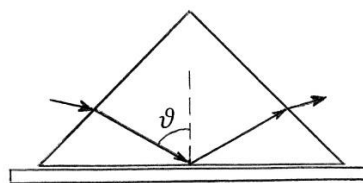


Рис. 2. Схема введення випромінювання у хвилевід.

Результати та їх обговорення.

На рис. 3 представлено кутові залежності 4-ї компоненти вектора Стокса для усіх чотирьох зразків при відбивання світла від їх поверхні. Спостерігається закономірне спадання цієї компоненти з переходом через нуль зі зменшенням кута падіння світла на зразок.

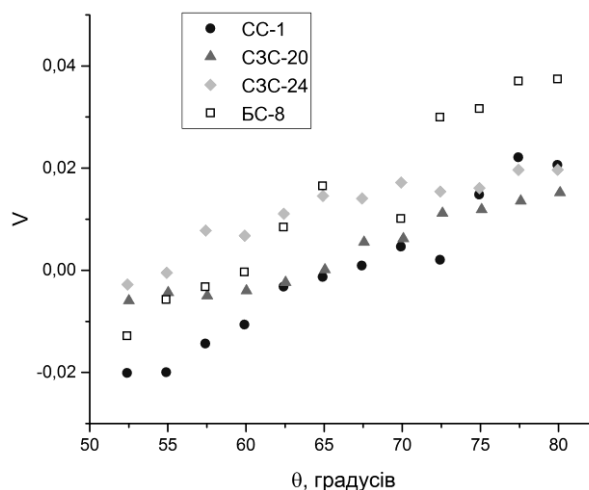


Рис. 3. Кутові залежності V-компоненти вектора Стокса досліджуваних зразків.

Порушений поверхневий шар утворюється в результаті хіміко-механічної обробки поверхні скла під час виготовлення оптичної деталі. Існують різні методики досягнення високого класу чистоти поверхні. На початковому етапі в будь-якому разі поверхня шліфується. Потім за допомогою спеціальних полірувальних сумішей відбувається поступове зняття мікронерівностей на поверхні. При цьому на поверхню чиниться тиск. Також іноді застосовують обробку магніореологічними полірувальними суспензіями [3], що дозволяє виключити процес притирання полірувальника, керувати інтенсивністю зняття матеріалу і досягнути вищої якості поверхні. Існує також метод іонної обробки [3], що поступово видаляє певні компоненти скла з поверхні. У будь-якому разі, як свідчать літературні дані, оптичний профіль

має вигляд плавної кривої з максимумом на деякій глибині [3–5]. Верхня область має шорстку структуру, під нею знаходяться тріщинуваті області з механічними напруженнями (або слідами від них). А це означає, що таку структуру можна розглядати як слабонаправляючий градієнтний підповерхневий хвилевід.

Звичайно, очікувати, що у відбитому світлі з'являться лінії поглинання, пов'язані зі збудженням ТЕ і ТМ мод, не варто, адже завдяки неоднорідності такий хвилевід матиме високе затухання. Однак певні зміни в інтенсивності все ж повинні бути.

Існує кілька методів введення випромінювання в хвилевід, зокрема для цього використовується дифракційна ґратка або призма внутрішнього відбивання. Використання призми в даному випадку простіше і дає кращий коефіцієнт спряження. Було виконано введення випромінювання з лінійною поляризацією, орієнтованою в р- і s-напрямах. Коефіцієнти відбивання для чотирьох зразків наведені на рис. 4 - рис. 7.

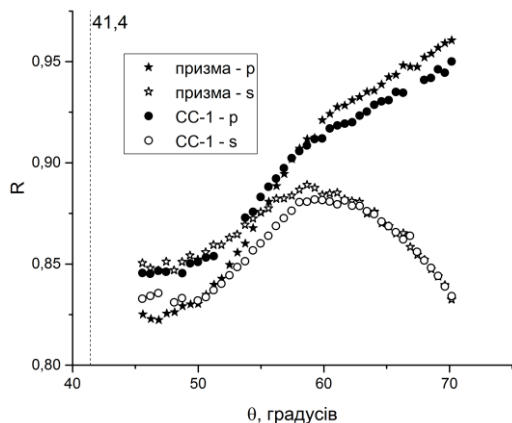


Рис. 4. Коефіцієнти відбивання для зразка СС-1.

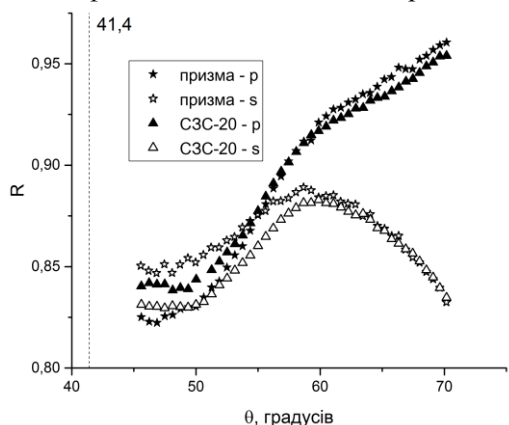


Рис. 5. Коефіцієнти відбивання для зразка СЗС-20.

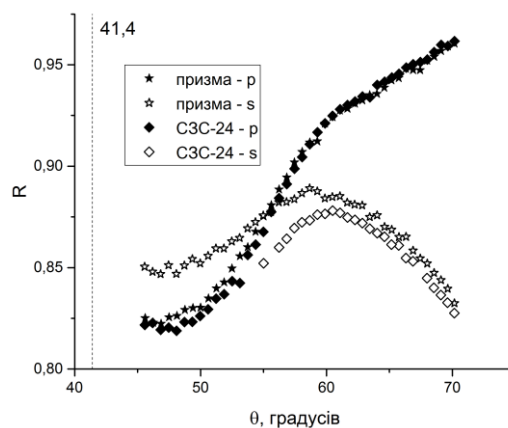


Рис. 6. Коефіцієнти відбивання для зразка СЗС-24.

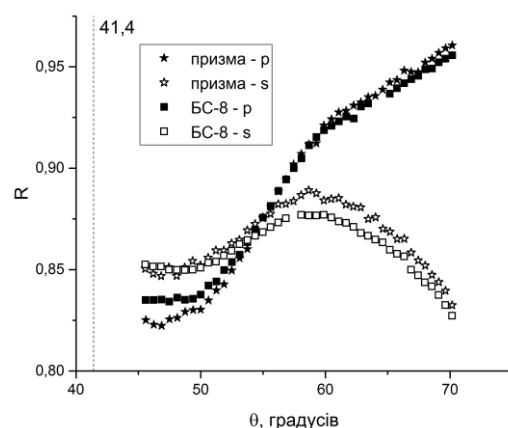


Рис. 7. Коефіцієнти відбивання для зразка ВС-8.

На графіках спостерігаємо невелике (кілька відсотків) зниження коефіцієнтів відбивання, а отже, певна кількість енергії переходить у підповерхневий шар (поверхня гладенька, тож розсіянням нехтуємо). Для зразків СС, СЗС чітко спостерігається зменшення відбитої компоненти для випромінювання яке поляризоване в s напрямку, причому зі збільшенням кута падіння зменшується поглинання. В припущенні щодо збудження мод це означає, що ТЕ моди високих порядків поглинаються краще, а низьких – гірше. Це може бути пов'язано з більшою кількістю неоднорідностей на шляху променів, що відповідають модам вищих порядків. Інакша поведінка ТМ-мод (р-поляризація) є яскравим свідченням анізотропії.

Щодо скла ВС-8, для нього практично немає різниці у відбиванні порівняно з самою призмою. Це може бути пояснене невдалим вибором матеріалу призми – у неї занадто низький показник заломлення (1,511), а в даного скла – високий (близько 1,72). Для ефективного введення випромінювання показник заломлення призми повинен бути вищим за показник

заломлення як оболонки, так і серцевини хвилеводу. Для інших зразків ця умова порушується менше, що й дало невелике поглинання. Остаточне з'ясування можливості збудження мод вимагає застосування призми з важких сортів скла.

Як показують розрахунки ступеню поляризації p , суттєвої його кутової залежності немає. Однак, у випадку s -поляризації надхідного променя ступінь поляризації відбитого променя в середньому на 0,015 вищий, порівняно з p -поляризацією. Це має місце як зі зразком, так і за його відсутності, з порожньою призмою. Але варто відзначити, що в присутності зразка спостерігається невеликий підйом p у випадку s -поляризації надхідного променя. Величина

підйому складає 0,005 для СС-1, 0,000 для СЗС-24, 0,003 для СЗС-20 та 0,004 для БС-8.

Висновки

За допомогою Стокс-поляриметрії з призмовою схемою збудження хвилеводних мод (у припущенні справедливості гіпотези про його існування) показано, що поверхневий шар на оптичному склі є і він анізотропний.

Виходячи з невеликої варіації четвертого елементу вектора Стокса (0,02...0,05) відбитого від зразка променя не можна сказати, що ця анізотропія є істотною.

Список використаних джерел

1. Новиков А.А. Эллипсометрия неоднородных поверхностных слоев оптических элементов / А.А. Новиков, И.А. Храмцовский, В.Ю. Иванов, И.С. Федоров, А. Туркбоев // Приборостроение. Изв. вузов. – 2009. – №1. – с. 62-68.
2. Храмцовский И.А. Изменение оптических свойств поверхностного слоя при ионно-плазменном распылении кварцевого стекла / И.А. Храмцовский, Т.К. Вощенко, Л.А. Черезова, В.И. Пшеницын, А.А. Апинов // Оптика и спектроскопия. – 1988. – т. 65. – № 1. – с. 141-145.
3. Горляк А.Н. Определение оптических характеристик поверхностных слоев элементов оптотехники для их оптических соединений / А.Н. Горляк, А.Г. Новак, В.М. Солонуха, И.А. Храмцовский // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 5 (87). – с. 62-66.
4. Горляк А.Н. Исследование нарушенных слоев полированной оптической поверхности и напряжений в клеевых и бесклеевых соединениях оптических элементов методом эллипсометрии / А.Н. Горляк, Ю.В. Лисицын, О.С. Дрость, А.И. Семененко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2004. – т. 4. – № 5. – с. 30–34.
5. Макаренко О.В. Еліпсометрична діагностика поверхневого шару оптичного скла // О.В. Макаренко, Л.В. Поперенко, О.І. Завалістий, А.Л. Ямпольський // Український фізичний журнал. – 2019. – т. 64. - №5. – с. 442-447.

References

1. NOVIKOV, A.A., et. al. (2009) Ellipsometry of inhomogeneous surface layers of anisotropic optical elements. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*. vol. 1, 62-68 pp. (in Russian)
2. KHRAMTSOVSKY, I.A., et. al. (1988) Optical properties changes of the surface layer during ion-plasma sputtering of quartz glass. *Optics and spectroscopy*. vol. 65, iss. 1, 141-145 pp. (in Russian)
3. GORLYAK A.N., et. al. (2013) Optical characteristics definition of optical technology surface elements for their optical connections. *Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* iss. 5(87), 62-66 pp. (in Russian)
4. GORLYAK A.N., et. al. (2004) Investigation of disturbed layers of polished optical surface and stresses in adhesive and glueless joints of optical elements by the method of ellipsometry. *Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* vol. 4, iss. 5, 30-34 pp. (in Russian)
5. MAKARENKO O.V., et. al. (2019) Ellipsometric diagnostics of a transient surface layer in optical glass. *Ukr. J. Phys.* vol. 64, iss. 5, 442-447 pp.

Надійшла до редколегії 23.11.2020