

ЗАЩЕПКИНА Наталія

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>

e-mail: nanic1604@gmail.com

ВОЛОШИН Олександр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0001-7177-6573>

e-mail: voloshin2111@gmail.com

КОНТРОЛЬ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СВІТЛОФІЛЬТРІВ НА КРАТНИХ ДОВЖИНАХ ХВИЛЬ

Дослідження присвячено проблемі контролю виготовлення багатошарових вузькосмугових світлофільтрів на кратних довжинах хвиль та визначенню похибок, які виникають при виготовленні інтерференційних світлофільтрів методом екстремального контролю. Ця проблема набуває особливої гостроти при нанесенні на підкладки багатошарових покриттів та кратних довжинах хвиль і може спричинити випуск бракованих партій продукту, якщо її не вирішити.

Для ілюстрації наведеної вище похибки, в ході написання статті, було проведено експериментальне нанесення багатошарового покриття Ge на ряд зразків зі скла K8 та виміряно їх геометричну товщину. За допомогою формули Ейрі та методу Сванепула було визначено показник заломлення (n), коефіцієнт поглинання (k) і геометричну товщину плівки (d), на основі яких створено таблицю, що відображає зміну цих показників у залежності від довжини хвилі напilenня та дозволяє вивести шукану похибку напilenня.

В роботі розглянуто відхилення реальних параметрів світлофільтрів від змодельованих при їхньому виготовленні методом екстремального контролю на кратних довжинах хвиль. Приведено графік, який відображає змодельований цільовий результат. За результатами обчислень виведено відносну похибку напilenня, яка є шуканим відхиленням.

В результаті отриманих експериментальних даних було розраховано похибку фіксації шарів напilenня матеріалу, при напilenні методом екстремального контролю на кратних довжинах хвиль. Було виявлено, що зі збільшенням довжини хвилі напilenня та геометричної товщини напilenня матеріалу ця похибка зменшується. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень та корекції процесу напilenня.

Ключові слова: світлофільтр, похибка, точність, контроль, параметри, довжина хвилі.

ZASHCHEPKINA Nataliia, VOLOSHIN Oleksandr

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CONTROL OF MANUFACTURING MULTILAYER NARROWBAND LIGHT FILTERS AT MULTIPLE WAVELENGTHS

The study is devoted to the problem of controlling the production of multilayer narrow-band light filters at multiple wavelengths and determining the errors that arise during the production of interference light filters by the method of extreme control. This problem becomes particularly acute with multilayered substrates and multiple wavelengths and can lead to the release of defective batches of product if not addressed.

To restore the above error, during the writing of the article, an experimental application of a multilayer Ge coating on a number of K8 glass samples was carried out and their geometric thickness was measured. Using the Airy formula and the Swanepoel method, the refractive index (n), absorption coefficient (k) and geometric film thickness (d) were determined, on the basis of which a table was created that reflects the change in these indicators depending on the duration of the sputtering wavelength and allows you to find the search error of sputtering.

The work considers the change in the real parameters of light filters from those simulated during their manufacture by the extreme control method at multiple wavelengths. A graph is presented that reflects the simulated target result. Based on the results of the calculations, the relative sputtering error, which is the desired deviation, is derived.

Keywords: light filter, error, accuracy, control, parameters, wavelength.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.06.2026

Прийнята до друку / Accepted 20.07.2026

Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ЗАЩЕПКИНА Наталія, ВОЛОШИН Олександр

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Інтерференційні світлофільтри, як засіб монохроматизації світлового потоку, знайшли широке застосування у багатьох сферах науки і техніки, зокрема в науковому та аналітичному приладобудуванні, у військовій техніці в приладах наведення і далекомірах. При виготовленні сучасних вимірювальних приладів, однією з важливих характеристик, яких треба дотримуватися, є точність. Щодо інтерференційних світлофільтрів, то під точністю мається на увазі точність накладення шарів матеріалу на підкладку матеріалу.

Виготовлення інтерференційних світлофільтрів - складний технологічний процес, пов'язаний з випаровуванням матеріалів при атмосферному тиску у вакуумній камері 10^{-3} Па та осадженням плівок цих матеріалів у певній послідовності на підкладках при умові досягнення заданої товщини та стабільному показнику заломлення.

Конструкція світлофільтра, тобто кількість шарів, показники заломлення матеріалів та їх послідовність визначаються розробником на етапі проєктування світлофільтра, або його спектральних характеристик.

При проєктуванні світлофільтра визначається тип, який залежить від його функцій. Це може бути вузькосмуговий інтерференційний світлофільтр, що має смугу пропускання на рівні декількох відсотків від значення довжини хвилі центра смуги пропускання, або смуговий світлофільтр, що має значно більшу полосу, а також відрізаючі світлофільтри, що блокують певну область спектру та пропускають інші ділянки спектру.

В залежності від спектрального діапазону роботи світлофільтра та конструктивів, мають бути вибрані матеріали для наплення шарів з високим (В) та низьким (Н) показниками заломлення.

Для роботи в ближній та середній ІЧ областях спектру це можуть бути пари Si-SiO₂, або Ge-SiO₂, з показниками заломлення 3,3-3,6 для Si, 1,9-1,85 для SiO₂ та 4,0-4,7 для Ge. Значення показника заломлення плівки залежить від багатьох технологічних параметрів, в тому числі від тиску і складу залишкових газів в камері, температури підкладки та швидкості конденсації парів матеріалу на підкладку.

Випаровування плівкоутворюючих матеріалів проводиться за допомогою магнетронів, електронно променевих гармат, іонних гармат, або лазерного випромінювання.

Відповідність отриманого в результаті наплення світлофільтра розрахунковим даним залежить від забезпечення заданих технологічних умов і точності контролю оптичної товщини кожного шару.

Стан проблеми та її розв'язання

Контроль товщини кожного шару багатошарового покриття може бути забезпечений за допомогою методу "кварцевих вагів", при умові дотримання заданого показника заломлення плівки, або за допомогою оптичного контролю пропускання або відбиття плівки на заданій довжині хвилі – чверть хвильовий метод, коли пропускання або відбиття світла, що проходить через плівку і описується формулою Ейрі:

$$r^* = \frac{r_1 + r_2 e^{-2j\varphi^*}}{1 + r_1 r_2 e^{-2j\varphi^*}}, \quad (1)$$

де $\varphi^* = \frac{2\pi}{\lambda}(n-jk)d = \varphi - ja$.

Оптична товщина напленої плівки:

для одного шару при $k^2 \ll n^2$ досягає значення $nd = \lambda/4$

при $\text{tg}(2\varphi) = \frac{2nk(n_s^2 - n_0^2)}{k^2(n_s^2 - n_0^2) - (n^2 + k^2 - n_0^2)(n^2 + k^2 - n_s^2)}$,

$$\text{для } k^2 \ll 0.01, \text{tg}2\varphi = \frac{2nk(n_s^2 - n_0^2)}{-(n^2 - n_0^2)(n^2 - n_s^2)}, \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \frac{nk(n_s^2 - n_0^2)}{(n^2 - n_0^2)(n_s^2 - n^2)}, \quad (3)$$

де n_s – показник заломлення підкладки, n_0 – показник заломлення повітря,

n – показник заломлення матеріалу наплення.

При виготовленні вузькосмугових та відрізаючих світлофільтрів, що працюють в середній ІЧ області на основі пари матеріалів Ge-SiO₂ за допомогою фотометричного контролю оптичної товщини виникає проблема, яка пов'язана з відсутністю систем фотометрії для довжин хвилі більше 2500 нм, інтегрованих в обладнання для наплення.

Частково проблема вирішується за допомогою контролю оптичної товщини на кратних довжинах хвиль, в основному на $\frac{\lambda}{2}$ або $\frac{\lambda}{3}$, тобто напленням трьох шарів плівки товщиною $\frac{\lambda}{4}$ кожен, на довжині хвилі, що є рівною третині робочої для вузькосмугових фільтрів. Таке рішення потребує враховувати дисперсію показників заломлення плівок, та показники поглинання, особливо для плівок Ge, оскільки цей матеріал має область поглинання світла від УФ до майже 1800 нм.

Задля виготовлення світлофільтрів для середньої ІЧ області в якості матеріалу з високим показником заломлення використовують Ge, а в якості матеріалу з низьким показником заломлення - монооксид кремнію SiO₂. Області прозорості плівок матеріалів - для Ge- 1.8-25 мкм, для SiO₂-0.7-0.8 мкм.

Такий контроль здійснюється за допомогою фотометричного обладнання, яке включає джерело світла, систему дзеркал для проходження світлового потоку в камеру і направлення його на зразок або свідок, а також проходження через прозорі вікна у вакуумній камері з подальшим направленням його у монохроматор з фотоприймачем і пристроями підсилення і реєстрації.

Серійна апаратура, яка досі використовується, має обмежені можливості щодо фотометрії в діапазоні від 2,5 до 7 мкм, що пов'язано з труднощами передачі сфокусованого світлового потоку в цьому діапазоні, обмеженими параметрами монохроматора та фотоприймача. Екстремальний метод фотометричного контролю заснований на фіксації екстремуму пропускання:

$$nd = \frac{\lambda}{4}, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі, на якій здійснюється контроль,
 d – оптична товщина плівки напilenого матеріалу.

Для здійснення фотометричного екстремального контролю при виготовленні світлофільтрів для аналізу, наприклад CO_2 , довжина хвилі контролю має складати 4,3 мкм. Вирішення проблеми фотометрії може відбутися таким чином, що відбудеться перехід до контролю на кратних довжинах хвиль, для цього випадку на $\frac{\lambda}{3}$, при цьому світлофільтр, що має початкову конструкцію $\text{BnB2nBnB|N|BnB2nBnB}$, де В - шар плівки Ge, а Н - шар плівки SiO_2 , матиме вигляд: $3\text{B}3\text{N}3\text{B}6\text{N}3\text{B}3\text{N}3\text{B}|3\text{N}|3\text{B}3\text{N}3\text{B}6\text{N}3\text{B}3\text{N}3\text{B}$, але для довжини хвилі $\frac{\lambda}{3}$.

При контролі оптичної товщини плівки Ge в області достатньо сильного поглинання на довжині хвилі 1,25-1,4 мкм має бути врахована похибка фіксації екстремального значення пропускання, пов'язана зі зменшенням пропускання за рахунок збільшення поглинання світла плівкою, по мірі напilenня матеріалу.

Похибка фіксації оптичної товщини плівки визначається за формулою [1]:

$$\Delta nd = \frac{\Delta \phi \lambda}{2\pi}.$$

Таким чином, отримавши поточні значення показника заломлення і коефіцієнта екстинкції, ми можемо визначити “набіг фази” та похибку фіксації оптичної товщини плівки за рахунок поглинання енергії. Для експериментального визначення показників заломлення і коефіцієнтів екстинкції було нанесено зразки плівок Ge на підкладки, виготовлені зі скла К8.

Напilenня проводилось за допомогою електронно променевої гармати на серійні установці при тиску остаточних газів у вакуумній камері 10^{-3} Па, на 6 окремих зразках, плівок товщиною $\frac{5\lambda}{4}$ для довжин хвиль 1100, 1200, 1400, 1500, 1600 і 1700 нм.

Контроль оптичної товщини і фіксація мінімумів виконувалась за допомогою системи фотометричного контролю СФКТ 75 І.

Після напilenня за допомогою рефрактометра МИИ 4 були заміряні геометричні товщини плівок зразків. За спектральними характеристиками пропускання і виміряними товщинам були визначені показники заломлення та коефіцієнти екстинкції за методом Сванепула [2]:

$$n = \sqrt{N + \sqrt{N^2 + S^2}}, \quad (5)$$

де n – показник заломлення нанесеної на підкладку плівки,

$$S = \text{показник заломлення підкладки}, N = 2S \frac{T_{\max} + T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} + \frac{S^2 + 1}{2}.$$

Знаючи показники заломлення для двох сусідніх максимумів на довжинах хвиль λ_1 та λ_2 , можна вирахувати геометричну товщину нанесеної плівки d :

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)}, \quad (6)$$

де n_1 та n_2 – показники заломлення для двох сусідніх максимумів на довжинах хвиль λ_1 та λ_2 .

Результати вимірювань і розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Отримані результати для діапазону довжин хвиль від 1140 до 1790 нм

λ	k	n
1140	0.181	4.49
1240	0.1327	4.44
1400	0.0784	4.35
1540	0.0458	4.27
1740	0.01085	4.18
1790	0.009	4.132

На основі отриманих даних було розраховано набіг фази та відносна похибка фіксації товщини плівки GE за рахунок поглинання, для діапазону довжин хвиль від 1140 до 1790 нм. Дані розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків набігу фази та відносна похибка фіксації товщини плівки GE за рахунок поглинання, для діапазону довжин хвиль від 1140 до 1790 нм

$d(\text{нм})$	$\lambda(\text{нм})$	$\phi(\text{рад})$	$\Delta \phi(\text{рад})$	$\Delta d, \text{нм}$	Відносна похибка фіксації оптичної товщини плівки, %
63,47	1140	0,787	0,071	2,87	4,52
69,81	1240	0,764	0,048	2,14	3,06
80,46	1400	0,748	0,032	1,64	2,04
90,16	1540	0,735	0,019	1,09	1,21
104,07	1740	0,721	0,005	0,33	0,3
108,30	1790	0,717	0,001	0,07	0,06

Вплив похибок фіксації оптичної товщини на характеристики інтерференційних світлофільтрів можна пояснити на прикладі виготовлення вузькосмугового світлофільтра, що складається з двох елементарних сьомшарових конструкцій, розділених узгоджувачем шаром з низьким показником заломлення. Напилення цього світлофільтра контролюється на довжині хвилі $\lambda/3$.

Для прикладу розглянемо довжину хвилі напилення 1140 нм, яка може бути використана при виготовленні світлофільтрів для аналізу газів групи СН в області 3,4 мкм.

При напиленні 3 шарів Ge загальна похибка геометричної товщини за рахунок поглинання складає +2,87 нм, оскільки відбудеться взаємна компенсація похибок напилення шару 1 та 2.

Так похибка в + 2,87 нм буде присутня для першого і третього шарів світлофільтра із оптичною товщиною $\frac{3\lambda}{4}$, а при напиленні шарів 5 та 7 похибка матиме від'ємне значення, оскільки фіксація екстремуму за рахунок поглинання відбуватиметься раніше. Оскільки третій шар плівки Ge буде виконаний з похибкою оптичної товщини $2,87 \times 4,49 = 12,89$ нм, резонансний шар плівки з низьким показником заломлення, що має оптичну товщину 300 нм, буде виконаний з похибкою -12,87 нм, що складає 4,29% від заданої товщини, і як наслідок, довжина хвилі центра полоси пропускання отриманого зразка буде 3273 нм.

Вказана вище похибка може бути врахована попереднім розрахунком довжини хвилі оптичного контролю, з урахуванням також впливу коефіцієнту поглинання.

При виготовленні «відрізаючих світлофільтрів» структури B2H2B2H... 2H2BB2HB із контрольною довжиною хвилі в області сильного поглинання Ge, помилка фіксації першого та останнього шару буде мати різний знак, для першого це буде похибка зі знаком плюс, для останнього - зі знаком мінус. Подвійні шари за рахунок взаємної компенсації не отримуватимуть похибки за рахунок поглинання.

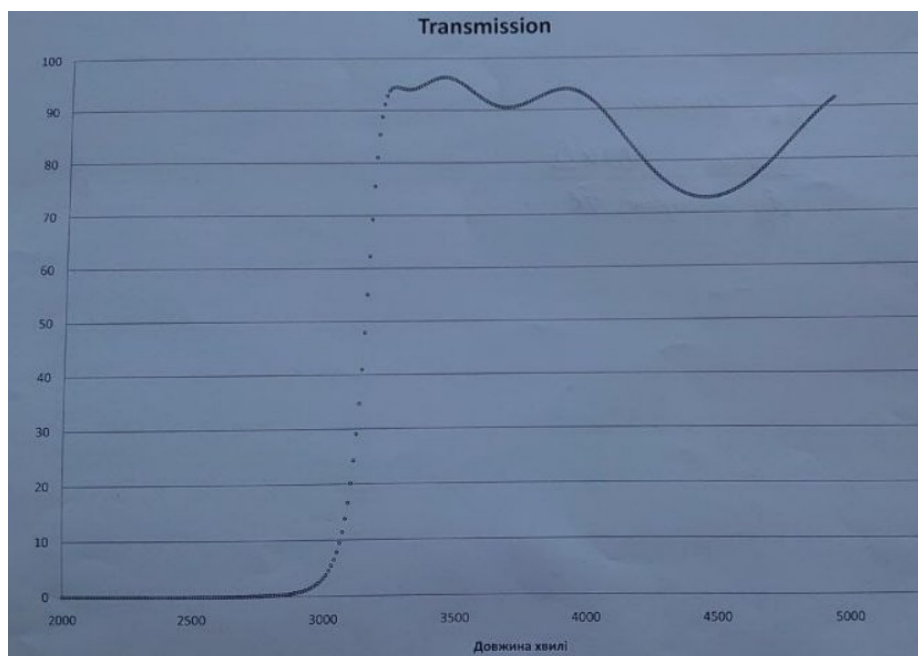


Рис 1. Розрахункова спектральна характеристика світлофільтра з врахуванням похибок за рахунок поглинання

Як показали розрахунки, похибки першого та останнього шарів світлофільтра приводять до появи додаткового відбиття у довгохвильовій області пропускання світлофільтра, що показано на рисунку 1.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті отриманих експериментальних даних було розраховано похибку фіксації шарів напилюваного матеріалу, при напиленні методом екстремального контролю на кратних довжинах хвиль. При напиленні 3 шарів Ge загальна похибка геометричної товщини за рахунок поглинання складає +2,87 нм. Похибка в + 2,87 нм буде присутня для першого і третього шарів світлофільтра із оптичною товщиною $\frac{3\lambda}{4}$, а при напиленні шарів 5 та 7 похибка матиме від'ємне значення. Третій шар плівки Ge виконаний з похибкою оптичної товщини $2,87 \times 4,49 = 12,89$ нм, резонансний шар плівки має оптичну товщину 300 нм, буде мати похибку -12,87 нм, що складає 4,29% від заданої товщини. Було виявлено, що зі збільшенням довжини хвилі напилення та геометричної товщини напилюваного матеріалу ця похибка зменшується. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень та корекції процесу напилення.

References

1. Knittl Z. Optics of Thin Films: An Optical Multilayer Theory. London: John Wiley & Sons, 1976.
2. Swanepoel, R. (1983). "Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon". Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 16, No. 12, pp. 1214–1222. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3735/16/12/023>
3. Airy, G. B. (1833). "On the phenomena of Newton's rings when formed between two transparent substances of different refractive powers" <https://scispace.com/papers/vi-on-the-phaenomena-of-newton-s-rings-when-formed-between-l-wy10d3awu>
4. Hass, G., & Thun, R. E. (Eds.). (1969). *Physics of Thin Films: Advances in Research and Development* (Vol. 5). Academic Press.
5. <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Ge&page=Ciesielski-2nm>,
<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Ge&page=Ciesielski-20nm>
6. ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF INTERFERENCE COATINGS FOR THE OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF NARROWBAND OPTICAL FILTERS Andriy Voronko, Denys Novikov, Dmytro Verbitskiy, Oleksandr Voloshyn, Oleksii Belkevych National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine