

PHYSICS

Моделювання впливу неоднорідностей на спектральні характеристики при створенні просвітлюючих фільтрів

О. Міца, Н. Боркач, Є. Задорожній, Р. Мельник, М. Сичов

Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

Paper received 12.09.20; Accepted for publication 24.09.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-238VIII29-09>

Анотація. Досліджено вплив часткової неоднорідності у високозаломлюючому шарі на основні характеристики ширококутового фільтру при різних робочих довжинах хвиль. Також досліджено стійкість спектральних характеристик ширококутового фільтру типу S-2ВН2В...2ВН2В відносно невеликих змін параметрів шарів методом Монте-Карло.

Ключові слова:

Ключові слова: часткова неоднорідність плівок, коефіцієнт пропускання, багатошарові інтерференційні покриття, широко-космугові фільтри, метод Монте-Карл.

При визначенні спектральних характеристик інтерференційних фільтрів необхідно враховувати властивості матеріалів із яких вони виготовляються [1–3]. Широко використовується у ширококугових фільтрах матеріал – дисульфід германію (GeS₂). Визначено [1–2], що межі GeS₂ є неоднорідними. Тому метою даної роботи було визначити вплив даної часткової неоднорідності на основні характеристики ширококугових фільтрів.

Побудуємо математичну модель для частково неоднорідного ширококутового інтерференційного фільтру. Виберемо високозаломлюючим шаром в даному фільтрі GeS₂. Будемо вважати, що даний матеріал складається із трьох областей: приповерхневої, центральної та перехідної. Центральна частина є однорідною, приповерхнева та перехідна області можуть бути неоднорідними. Будемо розглядати випадок, коли напрям поширення випромінювання співпадає з нормаллю до поверхні розділу.

Вибираючи за параметри показник заломлення n , геометричну товщину шару d і довжину хвилі λ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином [4–5]:

$$M_s(n, d, \lambda) = \begin{pmatrix} \cos \delta(n, d, \lambda) & -\frac{i}{n} \sin \delta(n, d, \lambda) \\ -in \sin \delta(n, d, \lambda) & \cos \delta(n, d, \lambda) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{де } \delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi nd}{\lambda}.$$

Задання неоднорідності показника заломлення з розподілом $n(z)$ по товщині в перехідному шарі здійснюється наступним чином. Перехідний шар розбивається на m_p рівних за товщиною зон-підшарів, і значення показника заломлення в них змінюється за вказаним законом. Аналогічно задається неоднорідність у приповерхневому шарі. Тому, враховуючи (1), характеристичні матриці перехідної і приповерхневої областей будемо задавати відповідно:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{m_p-1} M_s(n_{pj}, \frac{d_p}{m_p}, \lambda), \quad (2)$$

$$M_v(\lambda) = \prod_{j=0}^{m_v-1} M_s(n_{vj}, \frac{d_v}{m_v}, \lambda), \quad (3)$$

де d_p, d_v – геометричні товщини, n_{pj}, n_{vj} – показники заломлення j -ої зони-підшару перехідної і приповерх-

невої областей відповідно.

Так як високозаломлюючий шар містить перехідну і приповерхневу область, то враховуючи (2–3) його характеристичну матрицю можна записати

$$M_B(\lambda) = M_v(\lambda) \cdot M_s \left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp} - d_v \cdot n_{sv} \right), \lambda \right) \cdot M_p(\lambda),$$

де n_B – показник заломлення центральної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар буде мати характеристичну матрицю рівною:

$$M_H(\lambda) = M_s \left(n_H, \frac{1}{n_H} \left(\frac{\lambda_0}{4} - d_p \cdot n_{sp} - d_v \cdot n_{sv} \right), \lambda \right),$$

де n_H – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

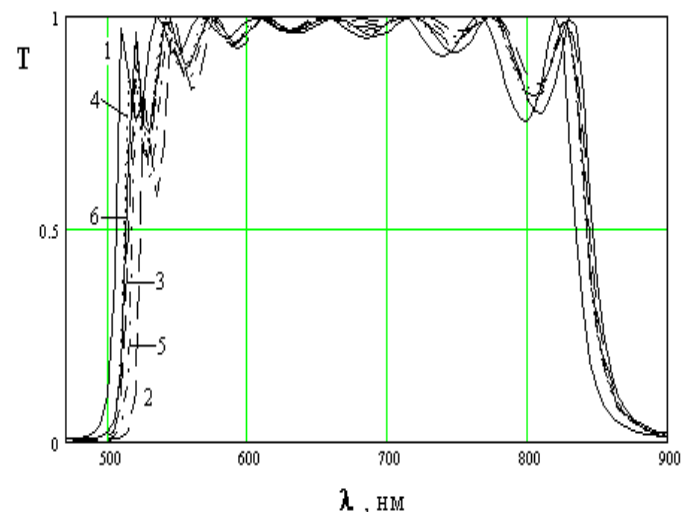


Рис. 1. Спектральні характеристики 17-шарової структури S-2ВН2В...2ВН2В ($\lambda_0=630$ нм) в ідеальному випадку та при наявності приповерхневої та перехідної областей з різними розподілами показника заломлення:

- 1 – ідеальний випадок;
- 2 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення;
- 3 – з лінійним розподілом показника заломлення;
- 4 – з квадратичним розподілом показника заломлення;
- 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення;
- 6 – з експоненціальним розподілом показника заломлення.

Характеристичну матрицю для широкопсмугового фільтру типу S-2ВН2В...2ВН2В, можна записати у вигляді

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \cdot M_B(\lambda).$$

Знаючи характеристичну матрицю всієї структури можна знайти коефіцієнт пропускання залежний від довжини хвилі λ :

$$T(\lambda) = \frac{4}{\left(2 + \frac{n_0}{n_s} M_{11}^2(\lambda) + \frac{n_s}{n_0} M_{22}^2(\lambda) + n_0 n_s M_{12}^2(\lambda) + \frac{1}{n_0 n_s} M_{21}^2(\lambda)\right)}$$

де n_0, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки відповідно.

При моделюванні будемо вибирати показники заломлення $n_0=1.0, n_s=1.51, n_H=1.35$, геометричні товщини $d_p=30$ нм та $d_v=5$ нм, кількість розбиттів перехідної і приповерхневої областей на зони-підшари рівна 30, робочі довжини хвиль $\lambda_0=480, 630, 750, 1000$ та 3000 нм. Для робочої довжини хвилі рівній 480 нм показник заломлення центральної частини плівки становить 2.1, перехідної та приповерхневої областей може досягати 2.6; для робочої довжини хвилі 630 нм – 2.05 і 2.5 відповідно; для робочої довжини хвилі 750 нм – 2.05 і 2.45 відповідно; для робочих довжин хвиль 1000 та 3000 нм – 2.0 та 2.4 відповідно.

Як бачимо з рисунку 1, для 17-шарового широкопсмугового фільтру при робочій довжині хвилі 630 нм ліві границі діапазонів пропускання для різних розподілів показника заломлення не впорядковані у порядку величини їх середнього значення показника заломлення перехідної та приповерхневої областей. Основними характеристиками широкопсмугових фільтрів є ширина смуги $\Delta\lambda_{0.5}$, ширина смуги $\Delta\lambda_{0.1}$ та середина діапазону пропускання λ_{cp} . Середина діапазону пропускання λ_{cp} визначається за формулою:

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{0.5}^L + \lambda_{0.5}^R}{2},$$

де $\lambda_{0.5}^L, \lambda_{0.5}^R$ – ліва права границі діапазону пропускання відповідно, значення коефіцієнта пропускання в яких рівне 0.5.

Розглянемо як на них вплине часткова неоднорідність високозаломлюючого шару (табл.1).

Як бачимо із таблиці 1, середина діапазону пропускання λ_{cp} зміщується в довгохвильову область відносно ідеального випадку на величину, яка прямо залежить від середнього значення показника заломлення перехідної та приповерхневої областей. Винятком є лінійний розподіл при робочій довжині хвилі $\lambda_0=480$ нм.

Таблиця 1. Вплив на основні характеристики 17-шарового широкопсмугового фільтру типу S-2ВН2В...2ВН2В перехідної і приповерхневої областей

Розподіли	Середина діапазону пропускання λ_{cp}	Ширина смуги $\Delta\lambda_{0.5}$	Ширина смуги $\Delta\lambda_{0.1}$
Робоча довжина хвилі $\lambda_0=480$ нм			
Ідеальний	509.670	245.940	262.808
Ступінчастий	519.933	233.955	248.426
Лінійний	517.915	243.348	259.813
Квадратичний	517.246	245.758	262.739
Логарифмічний	517.764	238.709	254.141
Експоненціальний	513.884	246.983	264.075
Робоча довжина хвилі $\lambda_0=630$ нм			
Ідеальний	670.242	328.464	352.469
Ступінчастий	683.985	320.948	343.475
Лінійний	678.777	327.585	351.555
Квадратичний	677.441	329.170	353.490
Логарифмічний	680.109	324.304	347.499
Експоненціальний	673.977	329.621	353.912
Робоча довжина хвилі $\lambda_0=750$ нм			
Ідеальний	797.906	391.028	419.606
Ступінчастий	811.911	386.490	414.298
Лінійний	805.843	390.975	419.684
Квадратичний	804.380	392.036	420.970
Логарифмічний	807.635	388.700	416.892
Експоненціальний	801.167	392.137	420.987
Робоча довжина хвилі $\lambda_0=1000$ нм			
Ідеальний	1066.070	530.793	572.425
Ступінчастий	1082.201	529.196	570.823
Лінійний	1074.482	531.801	573.883
Квадратичний	1072.725	532.412	574.621
Логарифмічний	1076.914	530.298	572.018
Експоненціальний	1069.330	532.044	574.033
Робоча довжина хвилі $\lambda_0=3000$ нм			
Ідеальний	3198.210	1592.378	1717.275
Ступінчастий	3217.057	1597.761	1724.504
Лінійний	3207.159	1595.612	1721.573
Квадратичний	3205.061	1595.166	1720.958
Логарифмічний	3210.398	1596.079	1722.226
Експоненціальний	3201.482	1593.881	1719.208

Ширини смуги $\Delta\lambda_{0.1}$ та $\Delta\lambda_{0.5}$ при робочих довжинах хвилі $\lambda_0=480, 630, 750$ та 1000 нм із збільшенням середнього значення показника заломлення досліджуваних областей зменшуються, за винятком експоненціального розподілу. Для нього значення цих основ-

них характеристик є більшим, ніж при ідеальному випадку. При робочій довжині хвилі $\lambda_0=3000$ нм із збільшенням середнього значення показника заломлення досліджуваних областей зростає відхилення від ідеального випадку.

Таблиця 2. Вплив на основні характеристики широкосмугового фільтру типу S-2ВН2В...2ВН2В перехідної і приповерхневої областей

Розподіли	Середина діапазону пропускання λ_{cp}	Ширина смуги $\Delta\lambda_{0.5}$	Ширина смуги $\Delta\lambda_{0.1}$
9-шарова структура			
Ідеальний	667.766	317.610	434.999
Ступінчастий	685.377	312.267	416.064
Лінійний	679.121	318.299	438.102
Квадратичний	677.276	319.512	443.781
Логарифмічний	680.869	315.245	425.619
Експоненціальний	672.370	318.960	440.893
25-шарова структура			
Ідеальний	672.190	336.808	346.944
Ступінчастий	685.323	328.481	338.055
Лінійний	682.623	330.842	345.667
Квадратичний	679.038	337.245	347.536
Логарифмічний	683.539	328.071	341.898
Експоненціальний	675.810	337.952	348.210

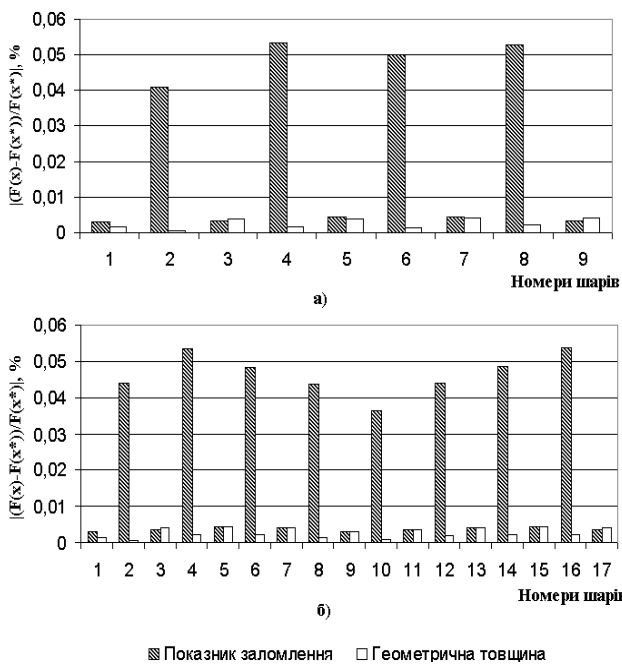


Рис. 2. Діаграма розсіювання цільової функції для широкосмугового фільтру типу 2ВН2В...2ВН2В з експоненціальним розподілом показника заломлення приповерхневої та перехідної областей при робочій довжині хвилі $\lambda_0=630$ нм, побудована за результатами аналізу методом Монте-Карло: а) 9-шарова структура; б) 17-шарова структура.

Із збільшенням кількості шарів зростають значення основних характеристик – середини діапазону пропускання λ_{cp} та ширини смуги $\Delta\lambda_{0.5}$ (табл. 2). Ширина смуги $\Delta\lambda_{0.1}$ при 17-ти шарах є більшою, ніж при 25-ти шарах. Це пояснюється стрімкішим спаданням коефі-

цієнта пропускання на границях діапазону пропускання.

Дослідимо стійкість спектральних характеристик широкосмугового фільтру типу S-2ВН2В...2ВН2В відносно невеликих змін параметрів шарів для різних типів розподілу показника заломлення методом Монте-Карло.

При визначенні стійкості спектральних характеристик інтерференційних фільтрів необхідно знати, що похибка вимірювання показника заломлення одного шару не більше ± 0.05 , а геометричної товщини – може становити ± 2 нм. Будемо застосовувати рівномірний розподіл для похибок. Розіб'ємо весь можливий діапазон значень похибок на 100 рівних частин і з кожної із них виберемо одне значення випадковим чином. Оцінити стійкість спектральних характеристик можна за величиною діапазону розсіювання.

Із рисунку 2 видно, що для широкосмугового фільтру чутливість спектральних характеристик до похибок показника заломлення парних шарів набагато більша, ніж чутливість до похибок інших параметрів.

Похибка геометричної товщини непарних шарів впливає на стійкість спектральних характеристик приблизно так, як і похибка показника заломлення, але більше, ніж похибка геометричної товщини парних шарів.

При збільшенні кількості шарів не завжди збільшується діапазон розсіювання, але, в цілому, зберігається тенденція до збільшення. Так для 9-шарової структури максимальне значення діапазону розсіювання становить 0.052, для 17-шарової – 0.054, для 25-шарової – 0.053 та для 33-шарової – 0.089.

REFERENCES

1. Golovach J., Mitsa A. Modelling spectral characteristics of structures with the layers based on dissociative materials // Book of Abstract 40th Hungarian conference on Spectrochemistry. Debrecen. Hungary. 1997. – P. M25.

2. Mitsa A., Pervak Yu., Gerasimov V. Modelling and diagnostics of characteristics of interference filter with layered-inhomogeneous high refractive index // Optical Diagnostics of Materials and Devices for Opto-, Micro- and Quantum Electronics (SPIE IV International Conference). Kiev. Ukraine. 1999. – P. 75.
3. Vegly P.G., Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. Efficient refinement algorithm for the synthesis of inhomogeneous optical coatings // Applied Optics. – 1997, Vol.36, №7. – P. 1487-1495.
4. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
5. Міца О.В., Головач Й.Г., Первак Ю.О. Матричний метод дослідження впливу неоднорідностей компонент короткоперіодних структур на їх характеристики // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. матем. і інф. – 2000. – Вип. 5. – ст. 75-80.

Modeling of influence of inhomogeneities on spectral characteristics at creation of enlightening filters

O. Mitsa, N. Barkats, E. Zadorozhnyi, R. Melnyk, M. Sychov

The influence of slightly inhomogeneous high refractive film's index on basic characteristics of wide band interference filter at different wavelength was investigated. The stability of the spectral characteristics of a broadband filter of the S-2BH2B... 2BH2B type with respect to insignificant changes in the parameters of the layers by the Monte Carlo method was also investigated.

Keywords: *slightly inhomogeneous films, light transmission, multilayer interference coating, the wideband interference filters, Monte Carlo method.*