

7. Новосядлий, С. П. Формування кремнієвих епітаксійних структур для суміщених Ві – К – МОН і Д – МОН технологій ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий // Металофізика і новітні технології. – 2002. – С. 353–365.
8. Новосядлий, С. П. Формування МОН – транзисторів з ізоляцією активних елементів пористим кремнієм [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. – 2009. – № 3 (31). – С. 35–39.
9. Новосядлий, С. П. Фізико – технологічні особливості формування металізації субмікронних арсенідгалієвих структур іонним фрезеруванням [Текст] / С. П. Новосядлий, Л. В. Мельник, Т. П. Кіндрат, В. М. Варварук // Східно–Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 4 (5) 64. – С. 1–6.
10. Ifeachor, E.C. A new microcomputer-based online ocular artefact removal (OAR) system [Text] / E. C. Ifeachor, B. W. Jervis, E. L. Morris, E. M. Allen, N. R. Hudson. – IEEE Proc. – 1986. – № 133. – С. 291–300. doi:10.1049/ip-a-1.1986.0040
11. Ifeachor, E. C. Knowledge-based enhancement of human EEG signals [Text] / E. C. Ifeachor, M. T. Hellyar, D. J. Mapps, E. M. Allen // IEEE Proc. – 1990. – № 137(5). – P. 302–310. doi:10.1049/ip-f-2.1990.0046
12. Harris, S. P. Automatic design of frequeneg sampling filters by hybrid Genetic Algorithm Techniques [Text] / S. P. Harris, E. C. Ifeachor // IEEE Trans-action on Signal Processing. – 1998. – № 46(K). – P. 3304–3314. doi:10.1109/78.735305
13. Симонов, В. В. Оборудование ионной имплантации [Текст] / В. В. Симонов, Л. В. Корнилов. – М: Радио и связь, 1988. – 354 с.
14. Риссел, Х. Ионная имплантация [Текст] / Х. Риссел, И. Руге. – М: Наука, 1983. – 360 с.
15. Болтакс, Б. И. Глубокие центры в GaAs, связанные собственными структурными дефектами [Текст] / Б. И. Болтакс, М. Н. Колотов, Е. А. Скоретина // Известия вузов. Физика. – 1983. – Т. 26, № 10.
16. Афанасев В. А. Оборудование для импульсной термообработки полупроводниковых материалов [Текст] / В. А. Афанасев, М. П. Духвський, Г. А. Красов. – Електроника СВЧ, 1984. – С. 56–58.
17. Окамото, Т. Устройства ионной имплантации [Текст] / Т. Окамото. – Саймицу кикай, 1985. – С. 1322–1325.

*Розроблено модель та досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від кута та поляризації. Наведено основні залежності зміни параметрів спектрів пропускання багатопарових інтерференційних структур вузькосмугових оптичних фільтрів при наявності перехідної області*

*Ключові слова: характеристична матриця, спектральні характеристики, спектр пропускання, неоднорідності показника заломлення*

*Разработана модель и исследовано влияние переходной области с неоднородным распределением показателя преломления на спектральные характеристики узкополосных фильтров в зависимости от угла та поляризации. Приведены основные зависимости изменения параметров спектров пропускания многослойных интерференционных структур узкополосных оптических фильтров при наличии переходной области*

*Ключевые слова: характеристическая матрица, спектральные характеристики, спектр пропускания, неоднородности показателя преломления*

УДК 519.85

# МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУЗЬКОСМУГОВИХ ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

**В. І. Пецко**

Аспірант

Кафедра кібернетики та прикладної математики\*

E-mail: petsko.vi@gmail.com

**О. В. Міца**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра інформаційних управляючих систем і технологій\*

E-mail: alex.mitsa@gmail.com

\*Ужгородський національний університет  
вул. Университетська, 14,  
м. Ужгород, Україна, 88000

## 1. Вступ

Синтез багатопарових оптичних систем за останні роки набув чималого розвитку, успіхи цих досліджень впливають як на розвиток оптики, так і інших галузей

науки та техніки. Тепер отримують інтерференційні фільтри будь-якого типу для всього оптичного діапазону з заданими спектральними характеристиками [1, 2]. Одним із найактуальніших завдань в оптичному приладобудуванні є створення вузькосмугових філь-

трів, оскільки галузь застосування дуже широка – це астрофізика, хімія, медицина, матеріалознавство, сенсорика, приладобудування [2, 3].

Перспективи розвитку оптоелектроніки, лазерної техніки та фотоніки вимагає розроблення й синтезу високоефективних багат шарових тонкоплівкових систем з низькими втратами та підвищеної хімічної стійкості. Для отримання таких систем необхідно вирішити питання вибору матеріалів підкладки і шарів, з яких складається система; розрахунку товщини шарів і оптичних параметрів конструкції. У зв'язку з цим необхідно контролювати товщини шарів таких покриттів, визначити вплив похибки напilenня на спектральні характеристики систем.

Актуальність цих досліджень має як практичне, так і теоретичне значення для розроблення й синтезу високоефективних багат шарових тонкоплівкових систем вузькосмугових фільтрів з низькими втратами та підвищеної хімічної стійкості.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Проблема моделювання спектральних характеристик оптичних покриттів з частковою неоднорідністю на даний час вирішена недостатньо. Неоднорідності на межах розділу плівка-підкладка є небажаними, так як затрудняють контроль геометричної товщини плівок при їх виготовленні. Необхідність в нових матеріалах для оптичних покриттів стимулювала дослідження профілю показника заломлення і концентраційного профілю компонент плівок безкисневих некрystalічних матеріалів. Такі плівки в залежності від складу є прозорими як у видимій так і у інфрачервоній ділянках спектру. На першому етапі досліджень некрystalічних частково неоднорідних плівок незалежно в [4, 5] була запропонована найпростіша шарувато-неоднорідна модель їх профілю показника заломлення. Не вирішеною залишається проблема модельного представлення неоднорідностей в частково неоднорідних плівках при неперервній зміні показника заломлення на межах розділу [6, 7]. Інтерес до особливостей вузькосмугових фільтрів прослідковується і в інших публікаціях. У роботі [8] досліджено поляризаційну чутливість відрізаючих фільтрів при невеликому значенні кута падіння. В [9] проведено дослідження впливу дисперсії на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів при падінні світла під кутом.

## 3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – дослідження спектральних характеристик вузькосмугових фільтрів при наявності часткової неоднорідності.

Було поставлено наступні задачі дослідження:

- 1) розроблення моделі часткової неоднорідності для вузькосмугових фільтрів;
- 2) дослідження впливу перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від кута та поляризації.

## 4. Математична модель частково неоднорідного шару

Розглянемо наступну шарувато-неоднорідну модель [8] профілю показника заломлення плівок, яка включає в себе основну та перехідну області (рис. 1). При розрахунках спектральних характеристик багат шарового покриття будемо враховувати тільки перехідну область у високозаломлюючій компоненті. Позначимо її товщину через  $d_p$ . Після проведення експерименту було виявлено, що геометрична товщина перехідної області ( $d_p$ ) може досягати до 30 нм. Задання неоднорідності показника заломлення з розподілом  $n(z)$  по товщині в перехідному шарі здійснюється наступним чином. Перехідний шар розбивається на  $m_p$  (в дослідженні вибиралось 10) рівних по товщині зон і значення  $j$ -ої зони перехідної області показника заломлення в залежності від типу розподілу визначається за відповідною формулою:

- 1) ступінчастий:  $n_{pj} = n_p$ ;
- 2) лінійний:  $n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{m_p - 1} \cdot (j - 1)$ ;
- 3) квадратичний:  $n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{(m_p - 1)^2} \cdot (j - 1)^2$ ;
- 4) логарифмічний:  $n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{\ln(m_p)} \cdot \ln(j)$ ;
- 5) експоненціальний:  $n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{m_p - 1} - 1} \cdot (e^{j - 1} - 1)$ ;

де  $n_{pj}$  – показник заломлення  $j$ -тої зони при розбитті перехідної області;  $n_f$  – показник заломлення основної частини плівки;  $n_p$  – показник заломлення перехідної області.

Геометрична товщина центральної частини плівки ( $d_f$ ) у цьому випадку:

$$d_f(d_p) = \frac{1}{n_f} \left( \frac{\lambda_0}{k} - d_p \cdot n_{sp} \right), \text{ де } n_{sp} = \frac{1}{m_p} \sum_{j=1}^{m_p} n_{pj}, \quad (1)$$

де  $n_{sp}$  – середнє значення показника заломлення в перехідному шарі відповідно;  $m$  – кількість розбиттів перехідного шару;  $k=2$  – коли розглядається напівхвильовий шар і  $k=4$  – коли розглядається четвертьхвильовий шар;  $n_f$  – показник заломлення основної частини плівки;  $\lambda_0$  – робоча довжина хвилі.



Рис. 1. Модель частково неоднорідної плівки (розподілу показника заломлення: 1 – ступінчастий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

Промодельюємо вплив перехідного шару в високозаломлюючій компоненті на спектральні характеристики за допомогою матричного методу Абе

[10, 11]. Вибираючи за параметри показник заломлення  $n$ , геометричну товщину шару  $d$  і довжину хвилі  $\lambda$ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином:

$$M_s(n, d, \lambda) = \begin{pmatrix} \cos \delta(n, d, \lambda) & -\frac{i}{p} \sin \delta(n, d, \lambda) \\ -ip \sin \delta(n, d, \lambda) & \cos \delta(n, d, \lambda) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi \cdot n \cdot d \cdot \cos \theta}{\lambda}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\theta$  – кут між променем і нормаллю до площини падіння. Значення

$p = n \cos \theta$  для ТЕ хвилі ( $s$ -поляризація) і  $p = \frac{n}{\cos \theta}$  для ТМ хвилі ( $p$ -поляризація).

Характеристична матриця перехідного шару буде рівна:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{mp-1} M_s(n_{pj}, d_p, \lambda). \quad (3)$$

Розглянемо вузькосмуговий фільтр конструкції  $S-[xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH(1-xB)]^4$ . Будемо вважати, що високозаломлюючий шар містить перехідну область. Тоді його характеристична матриця буде рівною:

$$M_B(\lambda) = M_s(n_B, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda), \quad (4)$$

де  $n_B$  – показник заломлення основної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар буде мати характеристичну матрицю рівною:

$$M_H(\lambda) = M_s(n_H, d_f(d_p), \lambda), \quad (5)$$

де  $n_H$  – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

Тоді характеристична матриця  $(4k+1)$ -шарової структури задається формулою:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \cdot M_s \times \\ \times \left( n_B, \frac{1}{n_B} \left( \frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp} \right), \lambda \right) \cdot \prod_{i=1}^k (M_H(\lambda) \cdot M_B(\lambda)). \quad (6)$$

Звідси ми легко можемо знайти коефіцієнт пропускання:

$$T = \frac{P_s}{P_0} |t|^2 = \frac{4}{\left( 2 + \frac{P_0}{P_s} m_{11}^2 + \frac{P_s}{P_0} m_{22}^2 + p_0 p_s m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (7)$$

де  $p_0 = N_0 \cos \theta_0$  і  $p_s = N_s \cos \theta_s$  для ТЕ хвилі

( $s$ -поляризація);  $p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0}$  і  $p_s = \frac{N_s}{\cos \theta_s}$  для ТМ хвилі

( $p$ -поляризація);  $\theta_0$  – кут під яким промінь на шарувату структуру;  $\theta_s$  – кут під яким промінь попадає із шаруватої структури, кут заломлення;  $n_0, n_s$  – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки відповідно,  $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$  – елементи характеристичної матриці  $M$ .

## 5. Дослідження кутових та поляризаційних параметрів вузькосмугових фільтрів

Вплив перехідної області на спектральні характеристики [8] вузькосмугових фільтрів розглянемо на прикладі 17-шарового вузькосмугового фільтра  $S-[xB(1-x)H]^4 2(1-x)V[xH(1-xB)]^4$  (рис. 2. *a, б*), для якого показник заломлення високого шару  $n_B = 2,3$  та низького  $n_H = 1,35$ , показник заломлення перехідної області  $n_p = 2,6$ , робоча довжина хвилі  $\lambda_0 = 630$ . Для таких розрахунків було розроблено програмне забезпечення на мові програмування Delphi 7.

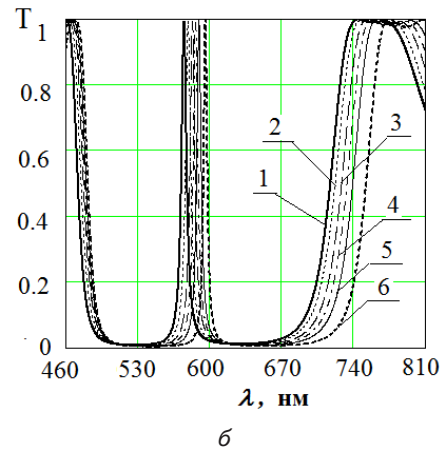
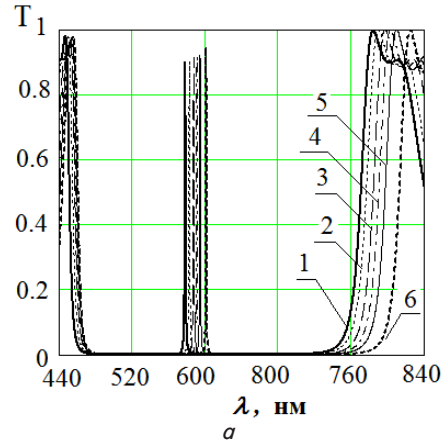


Рис. 2. Спектральні характеристики 17-шарового фільтра при  $\theta_0 = 45^\circ$  ( $\lambda_0 = 630$  нм) в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення: 1 – ідеальний випадок; 2 – з експоненціальним розподілом показника заломлення; 3 – з квадратичним розподілом показника заломлення; 4 – з лінійним розподілом показника заломлення; 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення; 6 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення; *a* –  $s$ -поляризація; *б* –  $p$ -поляризація

З табл. 1. видно, що при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом коефіцієнт пропускання при  $\theta_0 = 0^\circ$  збільшується на  $\Delta T = 0,0217706$ , з логарифмічним на  $\Delta T = 0,0126193$ , з лінійним на  $\Delta T = 0,0085272$ , з квадратичним на  $\Delta T = 0,00483$ , з експоненціальним на  $\Delta T = 0,0010717$ , при цьому робоча довжина хвилі при ступінчастому розподілі зміщується в область довгих хвиль на  $\Delta \lambda = 20,84$  нм (табл. 2),

на  $\Delta\lambda = 14,40$  нм при логарифмічному, на  $\Delta\lambda = 11,18$  нм при лінійному, на  $\Delta\lambda = 8,05$  нм, при квадратичному, на  $\Delta\lambda = 3,74$  нм при експоненціальному. Отже найбільше впливає на спектральні характеристики ступінчастий розподіл показника заломлення перехідної області. Далі йдуть логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний.

на  $\Delta T = 0,0383796$  і  $\Delta\lambda = 22,94$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta T = 0,0505867$  і  $\Delta\lambda = 23,89$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta T = 0,0543263$  і  $\Delta\lambda = 24,18$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta T = 0,0662354$  і  $\Delta\lambda = 25,16$  нм. Звідси випливає, що для s-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта

Коефіцієнт пропускання

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29'	60°	75°
s-поляризація						
Ідеальний	0,9587149	0,9404918	0,9056039	0,8475903	0,8198669	0,5960574
Експоненціальний	0,9597866	0,9418814	0,9074613	0,8500532	0,8225212	0,5993514
Квадратичний	0,9635449	0,9466961	0,9138566	0,8581573	0,8310754	0,6095356
Лінійний	0,9672421	0,9514642	0,9201487	0,8663707	0,8403614	0,6205974
Логарифмічний	0,9713342	0,9567738	0,9272983	0,8760161	0,8505212	0,6323141
Ступінчастий	0,9804855	0,9688199	0,9439835	0,8981770	0,8741932	0,6622928
p-поляризація						
Ідеальний	0,9587149	0,9738412	0,9910921	0,9999990	0,9983373	0,8938144
Експоненціальний	0,9597866	0,9747176	0,9916146	0,9999919	0,9981004	0,8927973
Квадратичний	0,9635449	0,9777132	0,9933265	0,9998368	0,9971448	0,8891301
Лінійний	0,9672421	0,9806099	0,9948897	0,9994727	0,9959686	0,8853420
Логарифмічний	0,9713342	0,9837635	0,9964584	0,9987831	0,9943364	0,8809160
Ступінчастий	0,9804855	0,9904630	0,9991171	0,9958738	0,9891690	0,8684357

Таблиця 1

пропускання, а також збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль. Для ступінчастого розподілу для p-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  коефіцієнт пропускання збільшується на  $\Delta T = 0,0166218$ , робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda = 20,81$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta T = 0,008025$  і  $\Delta\lambda = 20,78$  нм. При  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  ( $\theta_0 = 56^\circ 29'$  – кут Брюстера при показнику заломлення зовнішнього середовища  $n_0 = 1$ , та показнику заломлення підкладки  $n_s = 1,51$  при проходженні світла із зовнішнього середовища в підкладку) коефіцієнт пропускання зменшується на  $\Delta T = 0,0041252$  і робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda = 20,72$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta T = 0,0091683$  і  $\Delta\lambda = 20,67$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta T = 0,0253787$  і  $\Delta\lambda = 19,37$  нм. Отже для p-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області спочатку зменшуються відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а починаючи з кута

Таблиця 2

Робоча довжина хвилі

Розподіл\кут	0°	30°	45°	56°29'	60°	75°
s-поляризація						
Ідеальний	630,00	604,32	577,87	556,70	550,66	530,29
Експоненціальний	633,74	608,23	581,96	560,94	554,95	534,73
Квадратичний	638,05	612,75	586,72	565,90	559,97	539,97
Лінійний	641,18	616,03	590,18	569,51	563,63	543,78
Логарифмічний	644,40	619,41	593,74	573,23	567,39	547,70
Ступінчастий	650,84	626,15	600,81	580,59	574,84	555,45
p-поляризація						
Ідеальний	630,00	603,68	574,88	550,13	542,73	516,35
Експоненціальний	633,74	607,34	578,46	553,63	546,2	519,36
Квадратичний	638,05	611,61	582,68	557,81	550,35	523,08
Лінійний	641,18	614,73	585,8	560,92	553,46	525,96
Логарифмічний	644,40	617,96	589,04	564,15	556,68	529,03
Ступінчастий	650,84	624,49	595,66	570,85	563,40	535,72

$\theta_0 = 56^\circ 29'$  відхилення збільшується в сторону зменшення коефіцієнта пропускання. При цьому зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом напівширина  $\delta\lambda_{0,5}$  при  $\theta_0 = 0^\circ$  зменшується на  $\Delta\lambda = 0,81$  нм, при логарифмічному на  $\Delta\lambda = 0,46$  нм, при лінійному на  $\Delta\lambda = 0,30$  нм, при квадратичному на  $\Delta\lambda = 0,17$  нм, при експоненціальному на  $\Delta\lambda = 0,03$  нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  на півширина зменшується на  $\Delta\lambda = 0,53$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 0,3$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 0,16$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 0,13$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta\lambda = 0,02$  нм. Для p-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  на півширина зменшується на  $\Delta\lambda = 1,12$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 1,69$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 2,67$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 3,24$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta\lambda = 9,17$  нм. Звідси випливає, що при наявності перехідної області на півширина зменшується для всіх кутів обох поляризацій.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом на десятична ширина  $\delta\lambda_{0,1}$  при  $\theta_0 = 0^\circ$  зменшується на  $\Delta\lambda = 2,55$  нм, при логарифмічному на  $\Delta\lambda = 1,45$  нм, при лінійному на  $\Delta\lambda = 1,03$  нм, при квадратичному на  $\Delta\lambda = 0,53$  нм, при експоненціальному на  $\Delta\lambda = 0,09$  нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  на десятична ширина зменшується на  $\Delta\lambda = 1,67$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 0,98$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 0,56$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 0,47$  нм,

Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  коефіцієнт пропускання збільшується на  $\Delta T = 0,0283281$ , робоча довжина хвилі зміщується в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda = 21,83$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$

при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta\lambda = 0,2$  нм. Для р-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  десятична ширина зменшується на  $\Delta\lambda = 3,49$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 5,32$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 8,84$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 11,00$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  повністю розширюється на спектральний діапазон. Отже при наявності перехідної області на десятична ширина зменшується для всіх кутів обох поляризацій.

Ширина спектрального інтервала подавлення пропускання  $\Delta\lambda_k$ , всередині якого пропускання менше 0,1 для області менш короткохвильової чим  $\lambda_{\max}$  при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом при  $\theta_0 = 0^\circ$  збільшується на  $\Delta\lambda = 14,8$  нм, при логарифмічному на  $\Delta\lambda = 8,77$  нм, при лінійному на  $\Delta\lambda = 6,15$  нм, при квадратичному на  $\Delta\lambda = 3,79$  нм, при експоненціальному на  $\Delta\lambda = 1,20$  нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  даний інтервал збільшується на  $\Delta\lambda = 14,54$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 14,37$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 14,19$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 14,14$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta\lambda = 13,77$  нм. Для р-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  даний спектральний інтервал  $\Delta\lambda_k$  збільшується на  $\Delta\lambda = 14,49$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 14,80$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 16,46$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 17,62$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta\lambda = 44,1$  нм. Звідси випливає, що при наявності перехідної області ширина спектрального інтервала  $\Delta\lambda_k$  збільшується для всіх кутів обох поляризацій.

Ширина спектрального інтервала подавлення пропускання  $\Delta\lambda_d$ , всередині якого пропускання менше 0,1 для області більш довгохвильової чим  $\lambda_{\max}$  при наявності перехідної області з ступінчастим розподілом при  $\theta_0 = 0^\circ$  збільшується на  $\Delta\lambda = 21,04$  нм, при логарифмічному на  $\Delta\lambda = 11,51$  нм, при лінійному на  $\Delta\lambda = 7,88$  нм, при квадратичному на  $\Delta\lambda = 4,73$  нм, при експоненціальному на  $\Delta\lambda = 1,50$  нм. Для ступінчастого розподілу для s-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  даний інтервал збільшується на  $\Delta\lambda = 20,66$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 20,46$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 20,43$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 20,45$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  на  $\Delta\lambda = 20,23$  нм. Для р-поляризації при  $\theta_0 = 30^\circ$  даний спектральний інтервал  $\Delta\lambda_d$  збільшується на  $\Delta\lambda = 19,81$  нм, при  $\theta_0 = 45^\circ$  на  $\Delta\lambda = 19,33$  нм, при  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  на  $\Delta\lambda = 21,15$  нм, при  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\Delta\lambda = 23,07$  нм, при  $\theta_0 = 75^\circ$  такий інтервал вироджується. Отже при наявності перехідної області ширина спектрального інтервала  $\Delta\lambda_d$  збільшується для всіх кутів обох поляризацій.

Наявність перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення у високозаломлюючій компоненті для 17-шарового вузькосмугового

фільтру S-VNB.. 2В..VNB приводить до збільшення коефіцієнта пропускання на  $\Delta T = 0,0217706$  відносно ідеального випадку, зменшення робочої довжини хвилі в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda = 20,84$  нм, зменшення півширини пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  на  $\Delta\lambda = 0,81$  нм, зменшення десятичної ширини пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  на  $\Delta\lambda = 2,55$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_k$  на  $\Delta\lambda = 14,80$ , збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_d$  на  $\Delta\lambda = 21,04$ . Для 25-шарового фільтра відбувається збільшення коефіцієнта пропускання на  $\Delta T = 0,02174216$  відносно ідеального випадку, зменшення робочої довжини хвилі в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda = 20,80$  нм, зменшення півширини пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  на  $\Delta\lambda = 0,14$  нм, зменшення десятичної ширини пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  на  $\Delta\lambda = 0,42$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_k$  на  $\Delta\lambda = 13,14$ , збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_d$  на  $\Delta\lambda = 18,96$ .

Як бачимо, ці відхилення є меншими, ніж у випадку з 17-шаровими структурами. Подальше збільшення шарів теж зменшує різницю між ідеальним випадком різних меж між плівками та при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті. Це спостерігається при всіх можливих робочих довжинах хвиль і довільних кутах падіння світла.

## 6. Висновки

Типи розподілів показника заломлення перехідної області впливають на спектральні характеристики в наступному порядку: ступінчастий, логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний.

Для s-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а також збільшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль.

Для р-поляризації із збільшенням кута при наявності перехідної області спочатку збільшується відхилення від ідеального випадку в сторону збільшення коефіцієнта пропускання, а починаючи з кута  $\theta_0 = 56^\circ 29'$  (кут Брюстера) відхилення збільшується в сторону зменшення коефіцієнта пропускання. При цьому зменшується зсув робочої довжини в область довгих хвиль. При наявності перехідної області на півширина  $\delta\lambda_{0,5}$  та десятична ширина  $\delta\lambda_{0,1}$  зменшується, а ширина спектральних інтервалів  $\Delta\lambda_k$  та  $\Delta\lambda_d$  збільшується для всіх кутів для обох поляризацій.

## Література

1. Яковлев, П. П. Проектирование интерференционных покрытий [Текст] / П. П. Яковлев, Б. Б. Мешков. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
2. McLeod, H. A. Thin-Film Optical filters [Text] / H. A. McLeod. – Adam Hilger. London. 1985. – 386 p.
3. Крылова, Т. Н. Интерференционные покрытия [Текст] / Т. Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
4. Tikhonravov, A. V. Influence of small inhomogeneities on the spectral characteristics of single thin films [Text] / A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, B. T. Sullivan, J. A. Dobrowolski // Applied optics. – 1997. – Vol. 36, Issue 28. – P. 71–88. doi:10.1364/ao.36.007188
5. Holovach, J. Modeling spectral characteristics of structures with the layers based on dissociative materials [Text] / J. Holovach, O. Mitsa // Book of Abstract 40<sup>th</sup>. Hungarian conference on Spectrochemistry. Debrecen. Hungary, 1997. – M25 p.
6. Holovacs, J. Computer modelling of characteristics of structures with short periods [Text] : proc. 4th inter. conf. / J. Holovacs, A. Mitsa, V. Mitsa // Applied Informatics. – Eger-Noszvaj (Hungary), 1999. – P. 51–57.

7. Mitsa, A. Modelling of spectral characteristics on inhomogeneous (gradient) antireflective coatings based on chalcogenide glasses [Text] / A. Mitsa, V. Mitsa, A. Ugrin // J. Chalcogenide Letters. – 2005. – Vol. 2, No. 1. – P. 5–7.
8. Пецко, В. І. Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик відрізаючих оптичних фільтрів [Текст] / В. І. Пецко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 3/5 (69). – С. 32–38.
9. Пецко, В. І. Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів [Текст] / В. І. Пецко, О. В. Міца, І. В. Фекешгазі // Комп'ютерна математика. – 2014. – № 1. – С. 37–45.
10. Abeles, F. Matrix method [Text] / F. Abeles // Ann.de Physique. – 1950. – Vol. 5. – P. 596–640.
11. Furman, Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman., A. V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. – 242 p.

*Висвітлено суперечливість впливу підвищення кратності оптичного прицілу на ефективність стрільби снайпера. Розроблено методика, яка дозволяє визначити кратність оптичного прицілу за умов забезпечення заданого поля зору при виконанні вогневого завдання снайпером та сприятиме підвищенню ефективності виконання вогневого завдання. Методика може використовуватися при формуванні вимог до технічних характеристик зброї з оптичними прицілами*

*Ключові слова: снайпер, вогневе завдання, оптичний приціл, кратність, поле зору, ефективність стрільби*

*Показано противоречивое влияние повышения кратности оптического прицела на эффективность стрельбы снайпера. Разработана методика, которая позволяет определить кратность оптического прицела при условии обеспечения заданного поля зрения, что способствует повышению эффективности выполнения огневой задачи снайпером. Полученные результаты могут быть использованы при формировании требований к техническим характеристикам оружия, оснащенного оптическими прицелами*

*Ключевые слова: снайпер, огневая задача, оптический прицел, кратность, поле зрения, эффективность стрельбы*

УДК 623.44

## ВИЗНАЧЕННЯ КРАТНОСТІ ОПТИЧНОГО ПРИЦІЛУ ЗА УМОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОГО ПОЛЯ ЗОРУ

**О. І. Біленко**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра озброєння та спеціальної техніки\*  
E-mail: albilenko@yandex.ru

**Ю. О. Бєлашов**

Ад'юнкт  
Кафедра озброєння та стрільби\*  
E-mail: belashov.yura@yandex.ru

\*Національна академія  
Національної гвардії України  
пл. Повстання, 3, м. Харків, Україна, 61001

### 1. Вступ

На сьогоднішній день важливість і необхідність застосування снайперів як для збройних сил, так і для сил безпеки держави не викликають сумніву [1–3]. Специфіка цілей (командний склад і розрахунки потужних видів зброї противника, правопорушник, який захопив заручників або складає загрозу стороннім особам) та можливі наслідки не ураження цілі (загибель особового складу своїх військ, заручників, сторонніх осіб) вимагає виконання снайперського вогневого завдання з високою надійністю [4, 5]. Водночас з цим накладаються суттєві обмеження на час виконання завдання [6, 7], який не може перевищувати встановлених норм.

Треба зазначити, що промах снайпера сил оборони не є неприпустимим: та лише підвищує час на виконання вогневого завдання: при стрільбі на великі відстані передбачається виконання вогневого завдання декількома пострілами (для 7,62-мм снайперської

гвинтівки Драгунова СВД – до 12 патронів на ціль) [8]. Результати промаху снайпера сил безпеки є більш критичними аж до зриву виконання операції, у межах якої виконується вогневе завдання [9–11]. Отже, для сил безпеки сполучення високої надійності та оперативності виконання вогневого завдання є особливо актуальним.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз тактико-технічних характеристик снайперських гвинтівок, які перебувають на озброєнні силових структур, зокрема сил безпеки, провідних країн світу [12–14] свідчить про практичну відсутність зв'язку між прицільною відстанню гвинтівки та кратністю її оптичного прицілу (рис. 1).

З рис. 1 видно, що гвинтівки з різними прицільними відстанями (2, 3, 7, 11, 17) мають приціли з однаковою кратністю –  $\times 4$  або гвинтівки з однаковими