

Анализ на структури на многослойни просветляващи покрития за видимата спектрална област

Беркант Гъоч

Analysis of multilayer antireflection coating structures for the visible spectral region. Wide-band antireflection coating structures of two-, four- and six-layers from two materials with low and high refractive index in the visible spectral region are designed and investigated. An approach for selection of materials for coatings deposition based on optimisation of optical transmittance is proposed. New four-layer structures for two type semiconductor substrates are developed. It is shown that these structures possess very low reflection in the whole visible spectral region.

Key words: Wideband optical filters; Antireflection coatings; Visible optics.

ВЪВЕДЕНИЕ

Тънкослойните просветляващи покрития намират широко приложение в съвременните високи технологии (оптоелектронни, оптични, нанотехнологии и други), поради което от особено значение е подобряването на съществуващите и разработването на нови методи за тяхното проектиране и получаване. Нанасянето на тънкослойни покрития може съществено да промени експлоатационните свойства на работната повърхност на прибора: отражателна и пропускателна способност. Проектирането и получаването на тънкослойно покритие с предварително зададени оптични и механични свойства е сложна научна и актуална приложна задача [1].

Поради бързото развитие на съвременната оптоелектроника, особен интерес представляват просветляващите покрития за видимата спектрална област [2].

Най-простото просветляващо покритие е еднослойно, с оптична дебелина $nd = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4 \dots$ и показател на пречупване $n = n_{SUB}^{1/2}$ (n_{SUB} е показател на пречупване на подложката). То просветлява най-добре само при една дължина на вълната [1, 2]. Изборът на материали с подходящ показател на пречупване е силно ограничен дори за еднослойно просветляващо покритие. За широк спектрален диапазон се проектират просветляващи покрития от два, три и повече слоя от различни материали [1]. Подходящите методи за проектирането им се основават на числена оптимизация [3 - 5]. Винаги изборът на начална структура на покритието е от голямо значение за крайните резултати. От технологична гледна точка се предпочитат многослойни просветляващи покрития от два материала с висок и нисък показател на пречупване и минимален брой слоеве.

Настоящата работа има за цел изследване на просветляващите свойства в цялата видима спектрална област (0.38 - 0.78 μm) на многослойни покрития, състоящи се от слоеве само от два прозрачни материала с висок n_H и нисък n_L показател на пречупване върху подложки с $n=2.5$ и $n=3.5$.

МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕ

В проведеното изследване с помощта на числена оптимизация са получени структурите на многослойни покрития с просветляващи свойства във видимата област. За целта бе необходимо да се извърши следното: **Да се определи броя и подредбата на слоевете** - от 2 до 6 слоя, подредени в двата алтернативни варианта: *Въздух/LH ... /Подложка* или *Въздух/HL ... /Подложка*. L и H означават слоеве с нисък n_L и висок n_H показател на пречупване. **Да се дефинира вида на подложката** - $n_{SUB} = 2.5$ отговаря на подложка от съединения на основата на GaN, обикновено използвани при полупроводникови излъчватели на мощни светодиоди [4-9], $n_{SUB} = 3.5$ - на полупроводникови фотоприемници. **Да се изберат показатели на пречупване на слоевете** - използвани са стойностите на показателите за най-често срещаните прозрачни оптични материали $n_H = 1.7, \dots, 3.5$ и $n_L = 1.38, \dots, 1.60$ [1]. **Да се обособят началните дебелини на слоевете** - определени са от

следните условия: 1) всички слоеве да имат равни начални оптични дебелини; 2) сумата от всички оптични дебелини в многослойника да е $\sum nd = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$, за $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$. **Да се намерят крайните дебелини на слоевете, да се изчислят и анализират спектрите на пропускане.** Дебелините са определени чрез минимизация на следната функция:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [100 - T(\lambda_i)]^2}, \quad (1)$$

където λ_i е дължината на вълната в i точка от интервала, $T(\lambda_i)$ е изчисленото в % пропускане на многослойника за дължина на вълната λ_i . N е броят на точките, в които се изчислява спектъра на пропускане, в нашия случай $N = 150$, а на функцията Q - средно стойност на коефициента на отражение в избрания спектрален интервал.

Всички спектри на пропускане са получени като резултат от изчисления, основаващи се на теорията на характеристичните матрици.

Числената минимизация на Q -функцията (1) се основава на метода на златното сечение.

РЕЗУЛТАТИ

Представените по-долу многослойни просветляващи структури са получени като резултат от последователен анализ на голям брой оптимизирани просветляващи покрития с брой слоеве $N = 2, 3, 4, 5, 6$, алтернативна подредба на слоеве с нисък и висок показатели на пречупване (n_L и n_H), стойности на n_L от 1,3 до 1,6 и n_H от 1,9 до 4,0 и оптична дебелина $\sum nd = \lambda_0/4, 3\lambda_0/4$ и $5\lambda_0/4$. При тези начални условия са проектирани **4620** броя многослойни покрития. Извършена е оптимизация на всички структури.

В много от случаите дебелината на слой на дадена начална N -слойна структура след оптимизация става незначителна, практически изчезва ($d \ll 0.00001 \mu\text{m}$, и съответната оптимизирана структура се разглежда като $(N-1)$ -слойна. Шестслойна структура от типа $n_0/LHLHLH/n_S$ с начална оптична дебелина $\lambda_0/4$ след оптимизация дебелината на втория слой ($n_0/LHLHLH/n_S$) $d \ll 0.00001 \mu\text{m}$. Тази структура се разглежда като четирислойна ($n_0/LLHLH/n_S$) понеже двата слоя L се разглеждат като един.

В настоящата работа за оценка на качеството на многослойните структури се използва това, че:

- нанасянето на многослойник с по-малък брой слоеве е икономически по-изгодно;
- необходимо е ниско средното отражение Q в целия изследван диапазон;
- стойностите на Q да отговаря на условието $Q_{omn} < 1\%$.

След последователен анализ на всички многослойни структури върху подложка $n_{SUB} = 2,5$ са избрани три структури (представени в Таблица 1), отговарящи на условието да са със средно отражение $Q_{omn} < 1\%$.

Таблица 1. Просветляващи покрития за показател на пречупване на подложката $n_{SUB} = 2,5$: n_L и n_H нисък и висок показатели на пречупване на слоевете, Q_{omn} - средно отражение, $\sum d_i$ обща дебелина на покритието.

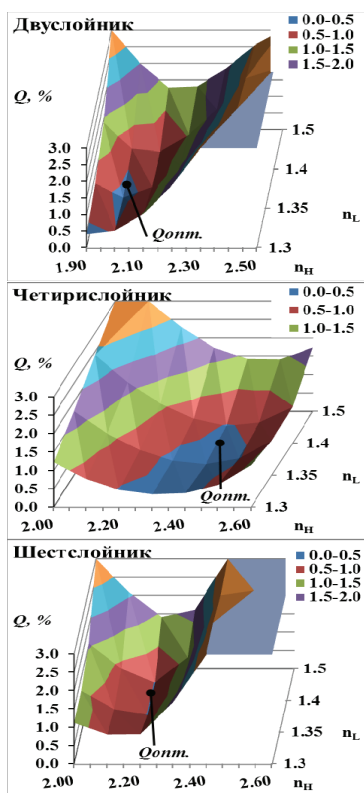
Структура	n_{SUB}	n_L	n_H	$\sum d_i, nm$	$Q_{omn}, \%$
2-слойник	2,5	1,38	2,05	156	0,39
4-слойник	2,5	1,38	2,35	174	0,34
6-слойник	2,5	1,38	2,2	326	0,43

След последователен анализ на всички многослойни структури върху подложка $n_{SUB} = 3,5$ са избрани три структури (представени в Таблица 2), отговарящи на условието да са със средно отражение $Q_{omn} < 1\%$.

Таблица 2. Просветляващи покрития на структури за показател на пречупване на подложката $n_{SUB} = 3,5$; n_L и n_H нисък и висок показатели на пречупване на слоевете, Q_{opt} - средно отражение, $\sum d_i$ обща дебелина на покритието.

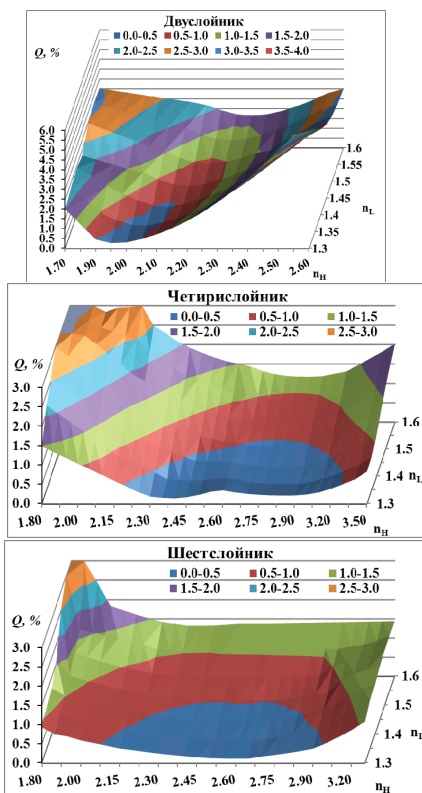
Структура	n_{SUB}	n_L	n_H	$\sum d_i, nm$	$Q_{opt}, \%$
2-слойник	3,5	1,38	2,35	148	0,58
4-слойник	3,5	1,38	3,1	184	0,19
6-слойник	3,5	1,38	3,1	268	0,33

Интерференционните покрития са изключително чувствителни към промяна на фазовата дебелина на слоевете. При многослойните структури изменението на показателите на пречупване на материалите на слоевете до някъде може да бъде компенсирано от изменение на дебелините [1,4-6]. Поради това представлява интерес изследване на възможностите на посочените типове структури за подобен род компенсация.



Фиг. 1. Зависимости на средното отражение Q от изменение на показателите на пречупване n_H и n_L на слоевете върху подложки с $n=2,5$ (без промяна на дебелините на слоевете).

Извършено е изследване на зависимости на средното отражение Q от изменение на показателите на пречупване n_H и n_L на слоевете, с което се цели:

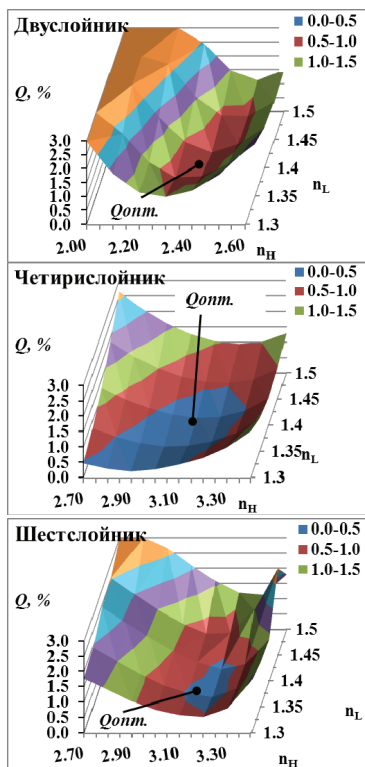


Фиг. 2. Зависимости на средното отражение Q от изменение на показателите на пречупване n_H и n_L на слоевете върху подложки с $n=2,5$ (с компенсация чрез промяна на дебелините на слоевете).

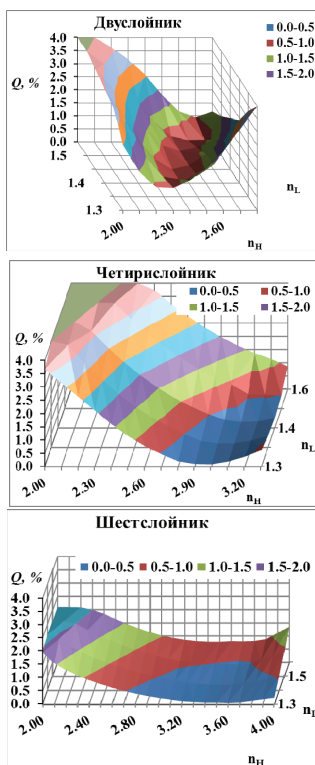
1) Да се предложи по-голям избор от материали за слоевете на покритието, отговарящо на условие $Q_{opt} < 1\%$ за целия спектрален диапазон. Отговарящите на това условие стойностите на Q от Фиг. 1 + 4 са оцветени: с червено за $Q_{opt} < 1\%$; със синьо - за $Q_{opt} < 0,5\%$.

2) Да се изследва устойчивостта на просветляващото покритие към изменението на показателите на пречупване.

Може ясно да се видят разликите в Q при изменение на n_H и n_L без промяна на дебелините на слоевете - фиг. 1 и с компенсация чрез промяна на дебелините на слоевете - фиг. 2 за $n_{SUB} = 2,5$. Същото за $n_{SUB} = 3,5$ е представено на фиг. 3 и фиг. 4 съответно. Влиянието на компенсацията чрез промяна на дебелините на слоевете най-ясно е изразено за шестслойните структури за двата типа подложки. Изменението n_L и n_H в широк интервал от стойности не променя съществено Q (синята и червената области на фиг. 2 и 4). Без компенсация при шестслойниците областта с $Q_{opt} < 0,5\%$ (синята област) се стеснява значително, фиг. 1 и 3. Това показва, че при шестслойниците изменението на показателите на пречупване на слоевете n_L и n_H без компенсация на дебелините не дава добри резултати.



Фиг. 3. Зависимости на средното отражение Q от изменение на показателите на пречупване n_H и n_L на слоевете върху подложки с $n=3,5$ (без промяна на дебелините на слоевете).



Фиг. 4. Зависимости на средното отражение Q от изменение на показателите на пречупване n_H и n_L на слоевете върху подложки с $n=3,5$ (с компенсация на дебелината на слоевете).

При всички покрития стойността $n_L = 1,38$ (което съответства на MgF_2) е предпочитана за използване във видимия спектрален диапазон. Магнезиевият

фторид се характеризира с добра устойчивост към външни въздействия, което го прави удобен за използване като външен слой на покритието.

Двуслойниците за двата типа подложки притежават добри просветляващи свойства, но в тесен диапазон от стойности на показателите на пречупване на слоевете. При избор на двуслойник с $n_L = 1,38$ трябва да се търсят материал с $n_H = 2,0 \div 2,1$ за $n_{SUB}=2,5$ и с $n_H = 2,4 \div 2,5$ за $n_{SUB}=3,5$. Изборът на материали с подходящи показатели на пречупване е силно ограничен.

Четирислойниците притежават добри просветляващи свойства в най-широка област от изменения на показателите на пречупване n_H и n_L . Дори и при изменение на n_H и n_L **без промяна на дебелините на слоевете** на покритието те запазват добри просветляващи свойства в много широк диапазон от стойности за показателите на пречупване на покритието. Изборът на материали с подходящ n_H е широк (n_H от $2,0 \div 2,7$ за $n_{SUB}=2,5$ и n_H от $2,6 \div 3,4$ за $n_{SUB}=3,5$) - ZnSe, ZnS ($n \approx 2,2$), TiO₂ ($n \approx 2,35$) и др. [1,6, 7-9]. Поради посочените по-горе причини за просветляващи покрития върху $n_{SUB}=3,5$ и $n_{SUB}=2,5$ се предлагат четирислойните покрития, понеже запазват добри просветляващи свойства с възможност за избор на различни материали за слоевете на покритието.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Настоящата работа представя резултатите от изследване на просветляващите свойства на многослойни покрития от материали с висок n_H и нисък n_L показател на пречупване, предназначени за видимата област ($0,38 \div 0,78 \mu\text{m}$). Дебелините на отделните слоеве са оптимизирани числено при различни стойности на n_H и n_L .

Направено е обобщено предложение за използване за проектираните многослойни покрития в зависимост от стойностите на с n_H и n_L .

За двата типа подложки с показател на пречупване $n_{SUB} = 2,5$ и $3,5$ са получени и предложени четирислойни структури с много добро просветляване в цялата видима област. Тези структури се характеризира с това, че са възможни вариации на n_L и n_H , при които просветляващите свойства на покритието се запазват оптимални.

Изследванията, използвани в тази работа са извършени при изпълнение на проект 2013-ФТ-04.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] H.A.Macleod, *Thin Film Optical Filters*. - Macmillan, NY (1986).
- [2] J. A. Dobrowolski, Daniel Poitras, Penghui Ma, Himanshu Vakil, Michael Acree, Toward perfect antireflection coatings: Numerical investigation, *Applied Optics*, 41 (2002) 3075-3083.
- [3] P.Baumeister, Evaluation of the Solutions for two Design Problems Presented at the 1998 Optical Interference Coatings Conference, *Applied Optics*, 39, No. 13, 2230, 2000.
- [4] Nenkov M., T. Pencheva. Symmetrical Five Layer Periods from Nonabsorbing High and Low Refractive Index Materials. - *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 14, No 3, 1997, pp. 686 – 692.
- [5] Daniel Poitras, J. A. Dobrowolski, Toward Perfect Antireflection coatings. 2. Theory, *Applied Optics*, 43 (2004) 1286 - 1295.
- [6] Born M., E. Wolf, *Principles of optics*. Pergamon, Oxford (1983) pp. 850.
- [7] Light emitting device including anti-reflection layer(s), US20080049431, 2008.
- [8] Multi-spectral filters, mirror and anti-reflective coating with subwavelength periodic features for optical devices, US20110085232, 2011.
- [9] Anti-reflective coatings comprising ordered layers of nanowires and methods of making and using the same, US20100112373, 2010.

За контакти:

Ас. Беркант Гъоч, Катедра "Физика", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 218, e-mail: b_gyoch@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.