

## Проектиране и анализ на просветляващи покрития за видима и инфрачервена спектрални области

Беркант Гъоч

### **Design and analysis of antireflection coatings for visible and infrared spectral regions:**

*Wide-band antireflection multilayer coatings for semiconductor substrates up to six layers using two materials with low and high refractive index in three spectral regions on InGaAs for Day/Night Vision are investigated. For InGaAs substrates optical properties of the best antireflection structures (one two-layer, one four-layer and one six-layer) for whole investigated spectral region 0.4  $\mu\text{m}$  – 1.7  $\mu\text{m}$  are compared. Admittance diagram for the best antireflection structure are presented.*

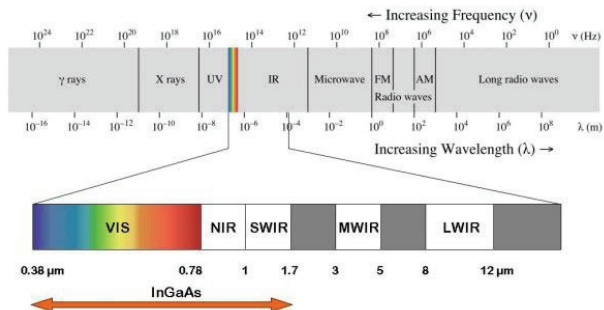
**Key words:** Wideband optical filters; antireflection coatings, visible spectral region, infrared spectral region.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Увеличеният интерес от проектиране и монтиране на охранителни системи, които могат да работят както през деня при достатъчна осветеност, така и през нощта (0 lx Фиг. 1.) налага използването на фотодетектори, които работят в двете спектрални области видимата и инфрачервена. За спектрален диапазон от 0,4  $\mu\text{m}$  до 1,7  $\mu\text{m}$  се използват фотодетектори от матричен тип (FPA - focal plane arrays) 1280 x 1024 пиксела VIS-InGaAs, които имат ниско ниво на шум [1].



Фиг.1. Дневна и нощна илюстрации на една и съща местност [2].



Фиг.2. Спектр на електромагнитните лъчения:  $\gamma$  rays – гама лъчение; X rays – рентгеново лъчение; UV – ултравиолетово лъчение; VIS – лъчение във видимата област; NIR, SWIR, MWIR и LWIR – близко, късовълново, средно и далечно IR – инфрачервено лъчение; Microwave – микровълново лъчение; Radio waves – радиовълни [3].

При определени условия телата придобиват възможността да преобразуват различни видове енергия в електромагнитна енергия, в резултат на което те излъчват електромагнитни вълни. Излъчване което се извършва вследствие на топлинното движение на атомите и молекулите се нарича топлинно излъчване. Топлинното излъчване се наблюдава при всички температури, по-високи от абсолютната нула. При ниски температури (например под 1000K) излъчените електромагнитни вълни са предимно от инфрачервената област на спектъра, а силно загряните тела (над 3000K) излъчват интензивно и видима светлина. При наличие на видима светлина в спектъра на излъчването телата светят [4].

Инфрачервената (ИЧ) спектрална област заема от  $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$  приблизително до  $\lambda = 800 \mu\text{m}$ . Често тя се разделя на: - близка ИЧ област –  $0,78 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1 \mu\text{m}$ ; късовълнова ИЧ област  $1 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,7 \mu\text{m}$ ; средна ИЧ област -  $3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$  и далечна ИЧ област -  $8 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 12 \mu\text{m}$  [2-6], Фиг. 2.

При пълен мрак (0 lx осветеност) Фиг. 1 камерите за наблюдение могат да регистрират изображения, като фотоприемниците им приемат (поглъщат) излъчените електромагнитни вълни от топлинното движение на атомите и молекулите, т.е. регистрират инфрачервеното лъчение попаднало върху фотоприемника.

Един от главните проблеми на приборите за дневно и нощно наблюдение е свързан с това, че значителна част от падащото върху приемника лъчение се отразява на границата между въздуха и оптичните елементи, което ограничава ефективността на такива прибори. Важен начин за намаляване на този вреден ефект и подобряване на характеристиките на фотоприемниците се заключава в намаляване на отражението чрез подходящи тънкослойни (антиотражателни, просветляващи) покрития върху оптичните елементи. Такъв метод служи за увеличаване на регистрираната част от падащото лъчение върху приемника в съответната спектрална област. Използването на просветляващите покрития може съществено да промени експлоатационните свойства на работната повърхност на прибора: отражателна и пропускателна способност. Това води до увеличаване на ефективността на *InGaAs* фотоприемник с около 30 %, понеже той отразява около 30 % от падналото върху фотоприемника лъчение, ако върху повърхността му няма нанесено просветляващо покритие [7-10].

### ПРОЕКТИРАНЕ НА ПРОСВЕТЛЯВАЩИ ПОКРИТИЯ

Просветляващи покрития, ефективни за широк спектрален диапазон винаги се реализират като многослойни. Проектирането и получаването на многослойно покритие с предварително зададени оптични и механични свойства е сложна научна и актуална приложна задача [10, 11].

Настоящата работа има за цел проектиране и изследване на просветляващите свойства в три спектрални области – видима, близка ИЧ и късовълнова ИЧ Фиг. 2 (0,4 – 1,7  $\mu\text{m}$ ) 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 от *InGaAs*.

Проектирането на многослойно просветляващо покритие се извършва с използване на методи за числова оптимизация. При използване на методите за числова оптимизация, структурата на многослойно покритие за широк спектрален диапазон (брой слоеве, показателите на пречупване и дебелините на отделните слоеве) се получава чрез числова минимизация на подходяща функция Q:

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

където  $\lambda_i$  е дължината на вълната в  $i$  – тата точка от избрания спектрален интервал,  $T(\lambda_i)$  е изчисленото в % пропускане на многослойното покритие за дължина на вълната  $\lambda_i$ .  $N$  е броя на точките, в които се изчислява спектъра на пропускане. В нашия случай е избран брой  $N = 150$ . Физичният смисъл на разликата  $100 - T(\lambda_i)$  е стойността на коефициента на отражение  $R$  в % при дължина на вълната  $\lambda_i$ . Тъй като не се отчита поглъщането на слоевете, *физическата същност на Q съответства на средноквадратичната стойност на коефициента на отражение в избрания спектрален диапазон 0,4  $\mu\text{m}$  – 1,7  $\mu\text{m}$* . По-ниската стойност на средноквадратичното отражение съответства на по-добри просветляващи свойства на дадените структури (при идеално просветляващо покритие  $Q=0\%$ ). При решаване на задачи от този тип изборът на първоначалната структура на покритието винаги е много важен за крайния резултат [10, 11].

Представените по-долу многослойни просветляващи структури са получени като резултат от последователен анализ на: голям брой оптимизирани просветляващи покрития с  $N = 2, 3, 4, 5, 6$  слоя; начална оптична дебелина  $nd = \lambda/4$ ,

$3\lambda/4$ ,  $5\lambda/4$  и алтернативна подредба на слоеве с нисък и висок показатели на пречупване ( $n_L$  и  $n_H$ ) т.е. всички слоеве да имат равни начални оптични дебелини и сумата от всички оптични дебелини в многослойника да е  $\sum nd = \lambda/4$ ,  $3\lambda/4$ ,  $5\lambda/4$ , за  $\lambda_{cp} = 1,05 \mu m$ .

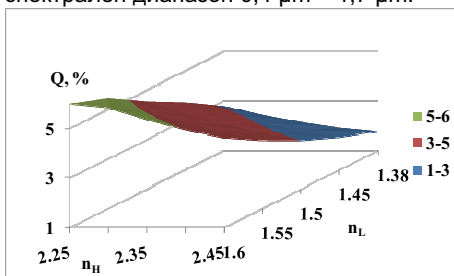
### РЕЗУЛТАТИ и АНАЛИЗ

При минимизиране на функция (1) в много от случаите дебелината на слой на дадена начална N-слойна структура след оптимизация става незначителна и съответната оптимизирана структура се свеждат към (N-1)-слойна.

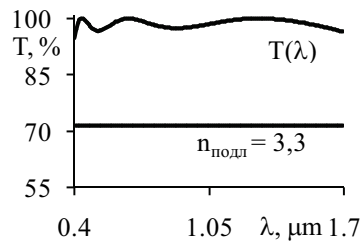
Получени са три просветляващи покрития с: - **двуслойна структура** от типа на Въздух/LH/Подложка (L - слой с нисък, H - слой с висок показатели на пречупване) със средноквадратично отражение  $Q > 5 \%$ ; - **четирислойна структура** от типа на Въздух/LHLH/Подложка със средноквадратично отражение  $Q > 5 \%$ ; - **шестслойна структура** от типа на Въздух/LHLHLH/Подложка със средноквадратично отражение  $Q = 1,7 \%$ .

За всяка една проектирана многослойна структура е изследвано средноквадратично отражение Q като функция от стойностите на високите показатели на пречупване ( $n_H$  от 2,2 до 2,45) и ниския показател на пречупване ( $n_L$  от 1,38 до 1,6). На Фиг.3 е представена тази зависимост за шестслойно покритие. Резултатите от изследванията показват, че четирислойна и двуслойна структури за тази спектрална област се получават с лошо средноквадратично отражение ( $Q > 5 \%$ ). Ето защо по – нататък изследванията са извършени само за шестслойна структура. Тя е с много по-добри оптични свойства в сравнение с останалите структури, запазва средноквадратично отражение под 5% за при промяна на показателите на пречупване в широк диапазон  $n_H$  от 2,3 до 2,45 и  $n_L$  от 1,38 до 1,55, Фиг.3.

Добрите просветляващи свойства на шестслойната структура може да подобрят с около 30% ефективността на фотоприемници за изследвания широк спектрален диапазон  $0,4 \mu m - 1,7 \mu m$ .



Фиг. 3. Зависимост на средноквадратичното отражение Q от стойностите на високите и ниския показатели на пречупване  $n_H$  и  $n_L$  на шестслойна структура.



Фиг. 4. Спектър на пропускане на шестслойна структура при стойности на ниския показател на пречупване  $n_L=1,38$  и на високите показатели  $n_H=2,45$ .

Средноквадратичното отражение на шестслойната структура за  $n_L=1,38$  и  $n_H=(2,45; 2,4; 2,35)$  е  $Q < 2 \%$ . На Фиг. 4 е представен спектър на пропускане на шестслойна структура при  $n_L=1,38$  и  $n_H=2,45$  за спектрален диапазон  $0,4 \mu m - 1,7 \mu m$ .

### ОПТИЧНА ПРОВОДИМОСТ

В основата на проектирането на тънкослойни оптични системи е застъпена величината оптична проводимост. Тя се дефинира като отношение между интензитетите на магнитното  $H$  и електричното поле  $E$  на електромагнитната вълна

( $Y=H/E$ ). За практически цели при анализ и проектиране стойностите на оптичната проводимост се нормират към стойността ѝ във вакуум [10, 11]:

$$Y' = Y / \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \quad (2)$$

Нормираната оптична проводимост  $Y'$  е безразмерна величина и за всяка немагнитна среда тя е равна на комплексния показател на пречупване  $n$ . Отражателната способност на една повърхност между среда с оптична проводимост  $Y'_0$  (обикновено въздух,  $Y'_0=1$ ) и среда с проводимост  $Y'$  се дава с израза:

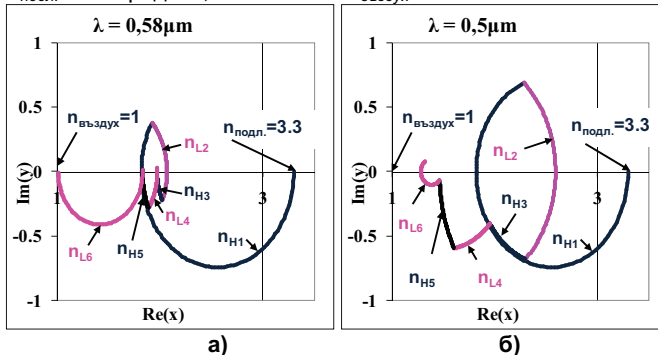
$$R = \left( \frac{Y'_0 - Y'}{Y'_0 + Y'} \right) \left( \frac{Y'_0 - Y'}{Y'_0 + Y'} \right) \quad (3)$$

Величината  $\delta$  се нарича фазова дебелина и за нормално падане е равна на  $2\pi nd/\lambda$  ( $n$  е показателят на пречупване на слоя,  $d$  е неговата дебелина). За непоглъщащ диелектричен слой върху подложка с показател на пречупване  $n_{\text{подл.}}$ , нормираната оптична проводимост на подложката и слоя се дава с израза [10, 11]:

$$y = \frac{n_{\text{подл.}} + (i \cdot n) \tan \delta}{1 + (i \cdot n_{\text{подл.}} / n) \tan \delta}, \quad i = \sqrt{-1} \quad (4)$$

Този израз позволява подложката с нанесен слой да се замени със среда с еквивалентна оптична проводимост и да се използва формула (3) за определяне на коефициента на отражение.

В началото на процеса на отлагане на слоя оптичната проводимост е  $Y' = n_{\text{подл.}}$ . С нарастване на слоя тя се изменя, като в комплексната у равнина ( $Y' = \text{Re}(x) + i \text{Im}(y)$ ) точката, съответстваща на  $Y'$ , се движи по дъга от окръжност. Движението е по посока на часовниковата стрелка, а центърът на окръжността лежи върху реалната ос  $\text{Re}(x)$ . Оптичната проводимост характеризира предаването на електромагнитната енергия между средите въздух-подложка за една дължина на вълната при зададени дебелини на слоевете и показатели на пречупване на подложката  $n_{\text{подл.}}$  и на средата; обикновено  $n_{\text{въздух}} = 1$ .



Фиг.5. Диаграми на оптична проводимост на шестслойна структура при  $n_L=1,38$  и  $n_H=2,45$ : а) средна дължина на вълната за видимия спектрален диапазон  $\lambda=0,58 \mu\text{m}$ , б)  $\lambda=0,5 \mu\text{m}$ .

На Фиг.5 са представени диаграми на оптичната проводимост: а) за дължина на вълната  $\lambda=0,58 \mu\text{m}$  и б) дължина на вълната  $\lambda=0,5 \mu\text{m}$ , при която имаме най-голямо отражение  $R \approx 3\%$  ( $T = 97,46\%$ ) от целия изследван спектрален диапазон, Фиг.4. От представените диаграми на оптичната проводимост се вижда, че имаме добро съгласуване при пренос на електромагнитна енергия между въздуха и подложката за дължина на вълната  $\lambda=0,58 \mu\text{m}$ . В този случай за крайните координати ( $y=0, x=1$ ) на

последния 6-ти слой (с нисък показател на пречупване)  $n_{L6}$  съвпада с  $n_{\text{въздух}} = 1$ . При  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ , коефициентът на отражение е  $R \approx 3\%$ . В този случай за крайните координати на  $n_{L6}$  се получава  $y = 0.0930$ ,  $x = 1.282$ . Преносът на електромагнитна енергия от въздуха към подложката е със загуби. Това може да се коригира, като се променят показателя на пречупване и дебелината на шестия слой на покритието. При тази корекция се влошава средноквадратичното отражение на просветляващото покритие за целия изследван спектрален диапазон, така че вариантът за структура на шестслойно покритие, разгледан по-горе е оптимален за съответната спектрална област.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирани и изследвани са просветляващите свойства на многослойни покрития в три спектрални области (видима, близка ИЧ и късовълнова ИЧ) с дължини на вълната от  $0,4 \mu\text{m}$  до  $1,7 \mu\text{m}$ . Покритията са изградени от слоеве само от два прозрачни материала с висок  $n_H$  и нисък  $n_L$  показател на пречупване върху InGaAs подложка. Изследвани са двуслойна, четирислойна и шестслойна структури. Двуслойната и четирислойната структури са с лошо средноквадратично отражение и резултати са представени само за шестслойна структура. Шестслойната структура притежава добър средноквадратично отражение за широк диапазон от стойности на високия  $n_H$  (от 2,3 - 2,45) и ниския  $n_L$  (от 1,38-1,55) показатели на пречупване на слоевете на покритието.

Средноквадратичното отражение на шестслойната структура е  $Q < 2\%$  за материали с показатели на пречупване  $n_L = 1,38$  и  $n_H = 2,45; 2,4; 2,35$ . Използването на такива просветляващи покрития може да подобри ефективността на фотоприемници от InGaAs за широк спектрален диапазон ( $\lambda = 0,4 \mu\text{m} - 1,7 \mu\text{m}$ ) с повече от 27%.

Изследванията, използвани в тази работа са извършени при изпълнение на проект ВУ – ЕЕС – 301/2007 и 2011-ФЕЕА-01.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Marlon D. E., Michael A. B., Joseph V. G., Thomas M. S., Jesse B., Joseph P., Mark S., Bora M. O., Performance of High Resolution Visible-InGaAs Imager for Day/Night Vision, Proc. of SPIE Vol. 6940, 69400O-2, (2008).
- [2] [www.infrared.com](http://www.infrared.com)
- [3] [www.raptorphotonics.com](http://www.raptorphotonics.com)
- [4] Попов Д., П. Машков, Й. Димов, Димитров Е. Насочена излъчвателна способност на телата, Научна сесия на РУ – ТК Силистра, публ. в Научни трудове на РУ, том 38, серия 9, 2001, стр. 55 – 57.
- [5] Зигел Р., Хауел Дж. Теплообмен излучением; “Мир”, Москва, 1975.
- [6] Mashkov P., T. Pencheva, D. Popov, V. Mateev. *Emission Spectra Control for Infrared Heaters by Electronic Pulse Management*. - Proceedings of IEEE, 26<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology – ISSE 2003, Stara Lesna, Slovak Republic, 2003, p.289 - 292.
- [7] [www.nightvision.com](http://www.nightvision.com)
- [8] [www.batop.de/information/n\\_AlGaAs.html](http://www.batop.de/information/n_AlGaAs.html)
- [9] [www.refractiveindex.info/](http://www.refractiveindex.info/)
- [10] H.A.Macleod, *Thin Film Optical Filters*. - Macmillan, NY (1986).
- [11] Born M., E. Wolf, Principles of optics. Pergamon, Oxford (1983) pp. 850.

### За контакти:

Беркант Сейдали Гьоч, Катедра “Физика”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Тел.: 082 888 218, E-mail: [b\\_gyoch@uni-ruse.bg](mailto:b_gyoch@uni-ruse.bg).

Докладът е рецензиран.