ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА *ELECTRICAL ENGINEERING*
2010. Вип. 61. С.180-187 *2010. Is. 61. P.180-187*

УДК 535.42; 535.421; 537.8

ПРОСВІТЛЕННЯ ҐРАТКОЮ МЕЖІ ПРОЗОРИЙ ДІЕЛЕКТРИК–ПОВІТРЯ

В. Фітьо, І. Яремчук

Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна
polyana@polynet.lviv.ua

Проаналізовано просвітлення поверхонь прозорий діелектрик–повітря з використанням діелектричних ґраток з прямокутним профілем або зі спеціальним рельєфом, які сформовані на поверхні прозорого діелектрика. Довежено, що таким методом можна забезпечити повне просвітлення окремо для кожної поляризації. Отримано наближені аналітичні вирази для визначення параметрів ґратки з прямокутним профілем. Розраховано оптимальні профілі штриха ґратки, які забезпечують мінімальне відбивання для хвиль TE- і TM-поляризацій. Зі збільшенням товщини рельєфної ґратки коефіцієнт відбивання зменшується в широкій смузі довжин хвиль.

Ключові слова: ґратка, просвітлення, рельєфна діелектрична ґратка.

Добре відоме просвітлення межі прозорий діелектрик–повітря додатковим шаром з певним показником заломлення $n = \sqrt{n_d}$ та певної товщини $\lambda = \lambda_0 / 4n_d$, [1], де n_d – показник заломлення прозорого діелектрика; λ_0 – базова довжина хвилі, на якій коефіцієнт відбивання від просвітленого діелектрика повинен дорівнювати нулю. Цей метод одношарового просвітлення не завжди можна точно реалізувати практично, оскільки неможливо підібрати матеріал просвітлювального покриття з потрібним показником заломлення, особливо коли показник заломлення діелектрика менший ніж 1,9. Тому для просвітлення використовують дво- та багатошарові покриття, які описані в численних працях, зокрема монографіях [2, 3], і ці методи практично стали класичними.

Ми розглянемо можливості просвітлення поверхонь прозорий діелектрик–повітря з використанням діелектричних ґраток, сформованих на поверхні прозорого діелектрика. Тут маємо дві можливості: просвітлення за допомогою діелектричної ґратки з прямокутним профілем та просвітлення ґраткою зі спеціальним рельєфом. Зазначимо, що перший метод еквівалентний одношаровому покриттю, тобто параметрами ґратки підбираємо показник заломлення еквівалентного просвітлювального шару, а другий — багатошаровому покриттю, точніше, просвітленню перехідним шаром з оптимальною зміною показника заломлення [4].

© Фітьо В., Яремчук І., 2010

Спочатку розглянемо перший метод.

Просвітлення ґраткою з прямокутним рельєфом. Просвітлення ґраткою з прямокутним рельєфом найліпше відбувається, якщо період Λ набагато менший від базової довжини хвилі λ_0. У цьому випадку на підставі виразів, які наведені в [4], можна розрахувати коефіцієнти заповнення ґратки (частина періоду ґратки, яка має більшу діелектричну проникність), відповідно, для хвиль TE- і TM-поляризацій:

$$F = \frac{\overline{\varepsilon} - \varepsilon_{21}}{\varepsilon_{22} - \varepsilon_{21}}, \tag{1}$$

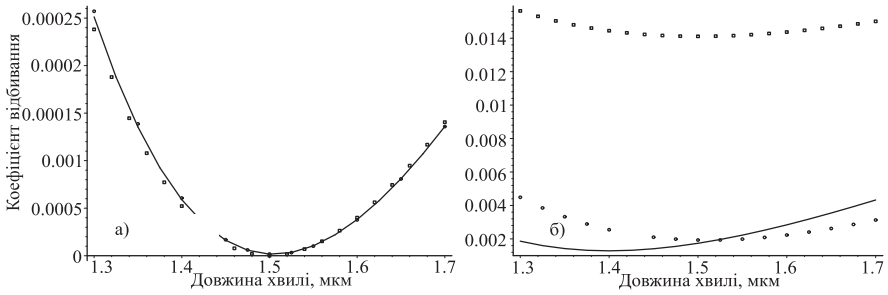
$$F = \frac{\varepsilon_{22}\left(\varepsilon_{21} - \overline{\varepsilon}\right)}{\overline{\varepsilon}\left(\varepsilon_{21} - \varepsilon_{22}\right)}, \tag{2}$$

де $\overline{\varepsilon}$ – еквівалентне значення діелектричної проникливості, чисельно повинна бути такою: $\overline{\varepsilon} = n^2 = n_d$; ε_{22} — більша діелектрична проникність матеріалу ґратки; ε_{21} — менша діелектрична проникність матеріалу ґратки, можна прийняти, що вона дорівнює 1.

Отже, за виразами (1) і (2), можна розрахувати коефіцієнти заповнення ґратки. Маючи показник заломлення (діелектричну проникність ε_d) прозорого діелектрика, який потрібно просвітлити на базовій довжині хвилі λ_0, можна знайти $\overline{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_d}$ та товщину еквівалентного діелектричного шару d, яка дорівнює товщині діелектричної ґратки. Якщо можливо, ґратку роблять на самій просвітлювальній поверхні. Нехай $\varepsilon_d = 2,25$, $\varepsilon_{22} = 2,25$, $\varepsilon_{21} = 1$, $\lambda_0 = 1,5$ мкм, тоді $\overline{\varepsilon} = 1,5$, $d = 0,3062$ мкм, коефіцієнти заповнення F для хвиль TE- і TM-поляризацій, відповідно, дорівнюють: 0,4 і 0,6. Коефіцієнти пропускання та відбивання від такої структури розраховували методом зв'язаних хвиль [5] за стійким числовим S-алгоритмом [6].

Для цих даних на рис. 1, *а* показані спектральні залежності коефіцієнта відбивання від просвітленої поверхні діелектрика. Маленькі кільця відповідають хвилям TE-поляризації, маленькі квадратики — хвилям TM-поляризації, а неперервна крива отримана на підставі одношарового просвітлювального покриття з показником заломлення 1,225 за товщини $d = 0,3062$ мкм. Очевидно, що такий показник неможливо отримати в однорідному шарі. Як бачимо, три криві накладаються одна на одну, що свідчить про правильність наведених розрахунків. Однак, не можна для обох поляризацій отримати повне просвітлення одною ґраткою, оскільки вони потребують різних коефіцієнтів заповнення. Отже, спектральні залежності, зображені на рис. 1, *а*, практично не можна одержати. Тому розрахунки проведено для $F = 0,5$ у разі тих самих діелектричних сталих, а еквівалентну діелектричну сталу ґратки $\overline{\varepsilon}$ розраховано за формулою для TE-поляризації [4]. Згідно з цією формулою $\overline{\varepsilon} = 1,625$. Відповідна товщина ґратки дорівнює 0,2942 мкм. Відповідні спектральні залежності відображено на рис. 1, *б*. Неперервна крива відповідає хвилям TM-поляризації, точки — хвилям TE поляризації, а квадратики розраховані в разі просвітлення однорідним шаром товщиною 0,272 мкм з показником заломлення 1,38.

Як випливає з рис. 1, *б*, діелектричною ґраткою з прямокутним рельєфом практично можна забезпечити низький коефіцієнт відбивання одночасно для обох поляризацій, який суттєво нижчий, ніж у разі просвітлення однорідним шаром, коли повне просвітлення однорідним шаром отримати неможливо. Просвітлення діелектричною ґраткою можна отримати не обов'язково за умови, що $\Lambda << \lambda_0$, а й у випадку $\Lambda < \lambda_0 / n_d$, проте в цьому разі втрачається простота наведених співвідношень для розрахунків. Однак, ці співвідношення, які стосуються еквівалентного шару, можна використати для наближених обчислень, навіть коли Λ в два–три рази менша, ніж λ_0.



а *б*

Рис. 1. Спектральна залежність коефіцієнта відбивання від просвітленої поверхні діелектрика $\Lambda = 0{,}3$ мкм

Мабуть, треба очікувати, що просвітлення ґраткою з прямокутним рельєфом технологічно важко досягти в оптичному діапазоні. Проте цим методом можна скористатись для виготовлення деталей з прозорого пластику методом штампування, якщо вони повинні функціонувати в далекому ІЧ- чи НВЧ-діапазонах. Тобто виготовлення деталі та просвітлювального покриття можна виконати за один цикл.

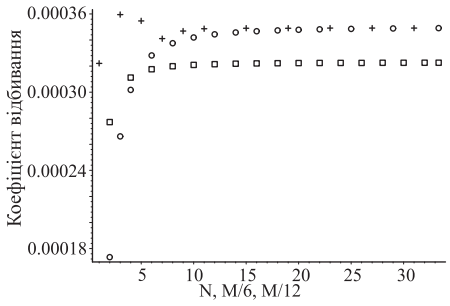
Просвітлення рельєфною діелектричною ґраткою. Просвітлення межі прозорий діелектрик–повітря можливо досягти за допомогою рельєфної ґратки, наприклад, з трикутним профілем. У цьому випадку будемо вважати, що діелектрична стала в межах товщини ґратки змінюється плавно від $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1d}$ до $\varepsilon_3 = 1$, і отже, треба очікувати низького коефіцієнта відбивання від межі двох середовищ. Однак просвітлення за допомогою ґратки можливе на таких довжинах хвиль, на яких нема поширення $\pm 1^{-x}$ та вищих дифракційних порядків в однорідних середовищах у вигляді плоских хвиль. Іншими словами, повинна виконуватись умова $\Lambda < \lambda / \max\left(\sqrt{\varepsilon_3}, \sqrt{\varepsilon_1}\right)$.

Коефіцієнти пропускання та відбивання розраховували методом зв'язаних хвиль за стійким R-алгоритмом для хвиль TE- і TM-поляризацій [7].

Аналізували ґраткову структуру за таких даних: $\Lambda = 1$ мкм, $\lambda > 1{,}5$ мкм, $\varepsilon_1 = 2{,}25$, $\varepsilon_3 = 1$ для трьох товщин ґратки: 1, 2 та 3 мкм. Однак спершу дослідили коефіцієнт відбивання залежно від кількості врахованих зв'язаних хвиль N та від

кількості шарів M, на які ділиться товщина ґратки d. На рис. 2 показано залежності коефіцієнта відбивання від кількості врахованих зв'язаних хвиль N та від кількості шарів $M = 200$ за довжини хвилі 2,15 мкм. З рис. 2 випливає, що при $N = 21$ та $M = 100$ маємо вже стабільні результати, які практично не залежать від N та M. Тобто задача не є складною для розрахунку методом зв'язаних хвиль.

На рис. 3 показано залежності коефіцієнта відбивання від довжини хвилі для ґратки (суцільні криві). Цифри біля кривих зазначено товщину ґратки, мкм. Великі кола на кривій *1* відображають коефіцієнт відбивання в разі поширення електромагнітних хвиль із середовища з ε_3 в середовище з ε_1. Числовий розрахунок засвідчив повний збіг коефіцієнтів відбивання та пропускання для обох випадків, тобто отримано повну взаємність. Криві, відображені малими кільцями, позначають спектральну залежність коефіцієнта пропускання, коли межа між діелектриками з $\varepsilon_1 = 2,25$ та $\varepsilon_3 = 1$ заповнена перехідним шаром, діелектрична проникність якого змінюється лінійно від координати z з $\varepsilon_1 = 2,25$ до $\varepsilon_3 = 1$.



+ – *1*, ° – *2*, □ – *3*

Рис. 2. Залежність коефіцієнта відбивання: *1* – від N при $M = 200$, *2* – від $M = 1 - 200$ при $N = 31$, *3* – та від $M = 1 - 400$ при $N = 1$, ТЕ-поляризація

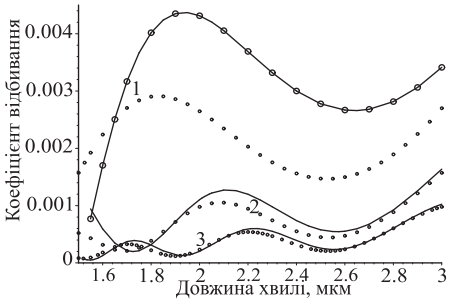


Рис. 3. Спектральна залежність коефіцієнта відбивання в разі просвітлення за допомогою ґратки з трикутним профілем, ТЕ-поляризація

Як бачимо, для товщини перехідного шару 3 мкм обидві криві практично збігаються. Тому на підставі формули [4]

$$n(z) = \frac{n_1 n_3 d}{(n_1 - n_3)z + n_3 d} \tag{3}$$

знайдемо оптимальний профіль штриха ґратки (коефіцієнт заповнення ґратки $F(z)$), відповідно, для хвиль TE- і TM-поляризацій, ґрунтуючись на таких формулах:

$$\varepsilon(z) = \left[\frac{n_1 n_3 d}{(n_1 - n_3)z + n_3 d}\right]^2 = \left[1 - F(z)\right]\varepsilon_1 + F(z)\varepsilon_3, \tag{4}$$

$$\frac{1}{\varepsilon(z)} = \left[\frac{(n_1 - n_3)z + n_3 d}{n_1 n_3 d}\right]^2 = \left[1 - F(z)\right]\frac{1}{\varepsilon_1} + F(z)\frac{1}{\varepsilon_3}. \tag{5}$$

Оптимальні профілі ґраток, відповідно, для хвиль TE- і TM-поляризацій на підставі виразів (4) та (5) описують так:

$$F(z) = \frac{\left[\frac{n_1 n_3 d}{(n_1 - n_3)z + n_3 d}\right]^2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}; \tag{6}$$

$$F(z) = \frac{\left[\frac{(n_1 - n_3)z + n_3 d}{n_1 n_3 d}\right]^2 - \frac{1}{\varepsilon_1}}{\frac{1}{\varepsilon_3} - \frac{1}{\varepsilon_1}}. \tag{7}$$

З формул (6) та (7) можна розрахувати коефіцієнти заповнення $F(z)$, що визначають профіль штрихів ґраток для обох поляризацій.

На рис. 4 зображено профіль штриха ґратки (суцільна крива: TE поляризація, крапки: TM-поляризація) відповідно до (6) та (7).

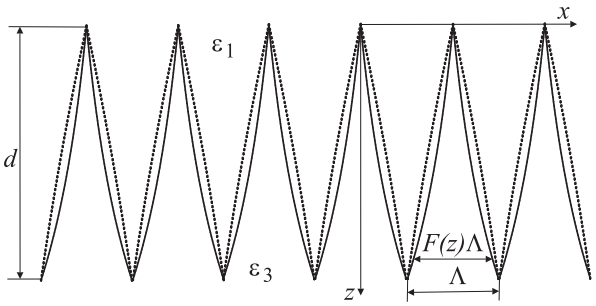


Рис. 4. Профіль штрихів ґратки

З рис. 4 бачимо, що профілі, які забезпечують мінімальне відбивання для обох поляризацій, дещо відрізняються, і ці профілі визначені кривими, які лежать по обидва боки від прямої лінії. Для цих профілів розрахуємо спектральну

залежність коефіцієнта відбивання від ґратки з такими параметрами: $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_3 = 2,25$, $d = 3$ мкм. На рис. 5 зображені відповідні залежності. Крива *1* розрахована матричним методом [8] для $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_3 = 2,25$, $d = 3$ мкм за умови, що діелектричну проникність перехідного шару описує вираз (3). Криві *2* (ТЕ-поляризація) та *3* (ТМ-поляризація) розраховані для профілів штрихів ґраток відповідно до формул (6) та (7). Крива *4* розрахована для хвиль ТМ-поляризації, проте для профілю, оптимального для хвиль ТЕ-поляризації.

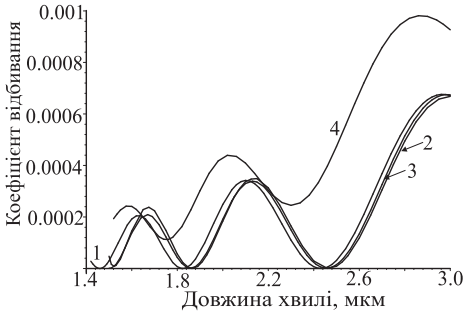


Рис. 5. Спектральні залежності коефіцієнта відбивання

Якщо порівняти криві *1*, *2* та *3*, які практично зливаються, то можна зробити висновок, що профілі штрихів ґраток, згідно з (6) та (7), забезпечують зменшення коефіцієнта відбивання у широкому спектральному діапазоні, однак мінімального відбивання за певної поляризації можна досягнути в разі відповідного профілю ґратки. В цьому розумінні лінійна зміна $F(z)$ від z є якоюсь мірою оптимальною для обох поляризацій.

Можна стверджувати, що просвітлення рельєфною ґраткою особливе тим, що ним можна забезпечити низьке відбивання у значно ширшій спектральній ділянці порівняно з просвітленням однорідним шаром чи діелектричною ґраткою з прямокутним профілем. Очевидно, що цей метод просвітлення також можна застосувати у далекій ІЧ- та НВЧ- ділянках спектра.

Отже, просвітлення ґраткою знімає обмеження на показник заломлення прозорого діелектрика. Однак повне просвітлення за допомогою ґратки можна отримати лише для окремої поляризації світла. Параметри ґраток для різних поляризацій дещо відрізняються. Вони можуть бути компромісними для обох поляризацій, а просвітлення буде ефективнішим, ніж просвітлення однорідним шаром. Знайдено оптимальний профіль штриха рельєфної ґратки для обох поляризацій. Коефіцієнт відбивання зменшується зі збільшенням товщини ґратки. За допомогою цього методу можна отримати ефективне просвітлення в широкому спектральному діапазоні, значно ширшому, ніж за допомогою просвітлення однорідним шаром чи діелектричною ґраткою з прямокутним профілем. Ґраткове просвітлення можна ефективно використати у далекій ІЧ- та НВЧ-ділянках спектра, оскільки саму прозору деталь та просвітлювальну структуру можна виготовити за один технологічний цикл з прозорого пластичного матеріалу.

1. *Dobrowolski J., Sullivan T.* Universal antireflection coatings for substrate for the visible spectral region // Appl. Opt. 1996. Vol. 35. N 25. P. 4993–4997.
2. *Honciuc G. Singurel G.* Antireflection optical coatings for the spectral range 400–700 nm, 400–900 nm and 800–1600 nm // J.of Optoelec. And Advanc. Mater. 2004. Vol. 6. N 4. P. 1199–1205.
3. *Первак Ю.О.* Оптика багатошарових покриттів: навчальний посібник для студентів фізичного та радіофізчного факультетів. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2005. 247 с.
4. *Fitio V.M., Bobitski Y.V.* Alternative methods for antireflection of optical surfaces with use of the transition layers and diffraction gratings // Proc. LFNM 2008, 10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Kharkiv, 2008. P. 139–141.
5. *Li L.* Use of Fourier series in the analisis of discontinuous periodic structures // J. Opt. Soc. Am. A. 1996. Vol. 13. N 9. P. 1870–1876.
6. *Фітьо В.М., Бобицький Я.В., Лаба Г.П.* Аналіз зонної структури 1D і 2D фотонних кристалів методом зв'язаних // Радіофізика і електроніка. 2005. Т. 10. № 1. С. 123–131.
7. *Фітьо В.М., Бобицький Я.В.* Аналіз зонної структури 2D фотонних кристалів методом зв'язаних хвиль: стійкий *R* – алгоритм // Укр. фіз. журн. 2008. Т. 53. № 6. С. 613–622.
8. *Bass M.* Handbook of Optics. New York: McGREAW-HILL, INC, 1995. Vol. 1. Dobrowolski J. A. Optical Properties of Film and Coatings // Chapter 12. – 130 p.

ANTIREFLECTION BOUNDARY OF THE TRANSPARET DIELECTRIC–AIR BY GRATING

V. Fitio, I. Yaremchuk

Lviv Polytechnic National University
S. Bandera Str., 12, UA-79013, Lviv, Ukraine
polyana@polynet.lviv.ua

Antireflection boundaries of the transparent dielectric – air by dielectric gratings with rectangular or special profiles, which are formed on the surface of the transparent dielectric, are analyzed. It is shown that this method can provide full antireflection separately for each polarization. Approach analytical expressions for determining the grating parameters with a rectangular profile are obtained. The optimal profiles of the grating grooves, which provide minimal reflection of TE and TM – polarizations are calculated. Reflectance decreases in the broad band of wavelengths when thickness of the relief grating increases.

Key words: grating, antireflection coating, relief dielectric grating.

ПРОСВЕТЛЕНИЕ РЕШЕТКОЙ ГРАНИЦЫ ПРОЗРАЧНЫЙ ДИЕЛЕКТРИК–ВОЗДУХ

В. Фитьо, И. Яремчук

Национальный университет "Львовская политехника"
ул. С. Бандеры, 12, 79013, Львов, Украина
polyana@polynet.lviv.ua

Проанализировано просветление поверхностей прозрачный диэлектрик–воздух с использованием диэлектрических решеток с прямоугольным или со специальным профилем, которые сформированы на поверхности прозрачного диэлектрика. Показано, что таким методом можно обеспечить полное просветление отдельно для каждой поляризации. Получены приближенные аналитические выражения для определения параметров решетки с прямоугольным профилем. Определены оптимальные профили штриха решетки, которые обеспечивают минимальное отражение для волн TE- и TM-поляризаций. С увеличением толщины рельефной решетки коэффициент отражения уменьшается в широкой полосе длин волн.

Ключевые слова: решетка, просветление, рельефная диэлектрическая решетка.

Стаття надійшла до редколегії 14.03.2010
Прийнята до друку 26.05.2010