

3. Буджак Я.С., Дружинін А.О., Островський І.П., Матвієнко С.М. Перенос носіїв заряду в легованих ниткоподібних кристалах твердих розчинів Si-Ge. // Фізика і хімія твердого тіла- Т.7, №2 (2006). – С. 212–216.

4. Буджак Я.С., Лопатинський І.Є. MathCAD в теорії термодинамічних та кінетичних властивостей кристалів: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2002. – 188 с.

5. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Liakh N.S. Study of piezoresistance in Ge_xSi_{1-x} whiskers for sensor application // Mater. Sci. Semicond. Process.– Vol.8, N1-3 (2005). – P. 193–196.

6. Chroboczek J.A., Pollak F.H., Staunton H.F. Impurity conduction in silicon and effect of uniaxial compression on p-type Si//Phil.Mag.-Vol.50 (1984). – P. 113–156.

УДК 53.082.54: 563.5

О.П. Кушнір

Львівський державний аграрний університет

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЯВУ КУТОВИХ УМОВ НЕМОНОТОННИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ В СПЕКТРАХ ФАБРИ-ПЕРО

© Кушнір О.П., 2006

З використанням обвідних функцій для енергетичних коефіцієнтів відбивання світла прозорою плівкою встановлені аналітичні вирази для псевдобрюстерівських кутів падіння світла в спектрах Фабрі-Перо.

With use of envelope functions for energetic coefficients of light reflection by a transparent film analytical expressions for pseudo Brewster angles of incidence in Fabry-Perot spectra are established.

Вступ

Тришарові структури містять в собі дві межі розділу, для кожної з яких можна визначити свій кут Брюстера α_{12Br} і α_{23Br} [1]. Проте для тришарової структури енергетичні коефіцієнти відбивання світла плівкою R для цих кутів не завжди приймають мінімальне значення. Тому виникає необхідність встановлення зв'язку між кутами падіння світла на плівку, для яких $R \rightarrow 0$ (псевдобрюстерівськими) та параметрами середовища, що і стало метою цієї роботи.

Загальні положення

Як видно [2,3] енергетичні коефіцієнти відбивання світла плівкою в точках дотику з їх обвідними дорівнюють

$$R_{\max} = \left(\frac{\sigma_{12} + \sigma_{23}\Omega}{1 + \sigma_{12}\sigma_{23}\Omega} \right)^2 \quad (1)$$

$$R_{\min} = \left(\frac{\sigma_{12} - \sigma_{23}\Omega}{1 - \sigma_{12}\sigma_{23}\Omega} \right)^2, \quad (2)$$

де $\Omega = \exp(\text{Im } \tilde{\delta})$, $\tilde{\delta} = \frac{4\pi d}{\lambda}(n - i\chi)$ – зсув фази хвилі в шарі з показником заломлення $\tilde{n} = n - i\chi$, товщина якого d $\tilde{r}_{12,23} = \sigma_{12,23} \exp(i\phi_{12,23})$ – амплітудні коефіцієнти Френеля на границях розділу:

середовище з показником заломлення n_1 – плівка і плівка – середовище з показником заломлення n_2 . З рівняння (2) слідує, що мінімум функції $R_{\min} \rightarrow 0$ і досягається за умови $\sigma_{12} = \sigma_{23}\Omega$.

Одержані результати та їх обговорення

Згідно з (1), (2) амплітуда розмаху між екстремальними значеннями R_{\max} і R_{\min} дорівнює

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min} = 4\sigma_{12}\sigma_{23} \frac{(1 - \sigma_{12}^2)(1 - \sigma_{23}^2)}{(1 - \sigma_{12}^2\sigma_{23}^2)^2}, \quad (3)$$

звідки одержуємо, що рівність (3) задовольняється трічі:

в несиметричних структурах ($\sigma_{12} \neq \sigma_{23}$)

а) при куті α_{12Br} , коли

$$\sigma_{12} = 0, \sigma_{23} \neq 0, \quad (4)$$

б) при куті α_{23Br} , коли

$$\sigma_{12} \neq 0, \sigma_{23} = 0 \quad (5)$$

в) в симетричних структурах ($\sigma_{12} = \sigma_{23}$) при спільному куті $\alpha_{12Br} = \alpha_{23Br}$, коли

$$\sigma_{12} = 0, \sigma_{23} = 0. \quad (6)$$

Кути $\alpha_{12,23}$ – це так звані кути Брюстера для одинарних меж розділів в p -поляризації. Рівність $\Delta R = 0$ вказує на те, що багатопроменева інтерференція при цьому куті падіння відсутня. У несиметричних ($n_1 \neq n_2$) структурах вона виконується для кута падіння α_{12} (4а), коли світло не відбивається межею 12, і для кута α_{23} , коли світло не відбивається межею 23.

У симетричних структурах ($n_1 = n_2$) $\sigma_{12} = \sigma_{23}$ і умова Брюстера виконується при одному куті $\alpha_{12} = \alpha_{23}$. Для кутів падіння $\alpha_{12,23}$ коефіцієнти відбивання дорівнюють $R(\alpha_{12}) = \sigma_{23}^2$ і $R(\alpha_{23}) = \sigma_{12}^2$, а отже, не залежать від товщини плівки. Тому експериментально значення $\alpha_{12,23}$ можна визначити як кут перетину контурів відбивання $R(\alpha)$, одержаних для декількох довжин хвиль. Отже, в спектрах похилого відбивання світла прозорими одношаровими структурами під кутами Брюстера обвідні до енергетичних коефіцієнтів відбивання дотикаються між собою

$$R_{\max} = R_{\min}. \quad (7)$$

Значення кута α_{psBr} , за якого задовольняється умова $\sigma_{12} = \sigma_{23}$ і, згідно з (2) $R_{\min}(\alpha_{psBr}) \rightarrow 0$, доцільно зарахувати до такого, за якого виконується псевдобрюстерівська кутова умова. В p -поляризації таких кутів α_{psBr} може бути три:

$$\alpha_{psBr1} = \arctg(n_{31}) \quad (8, a)$$

та

$$\alpha_{psBr2} = \arctg \sqrt{\frac{2n_{21}^2 n_{31}^2 (n_{21}^4 - n_{31}^2)}{2n_{31}^4 (n_{21}^2 - 1) - n_{21}^6 (n_{31}^2 - 1) + \sqrt{z}}}, \quad (8, б)$$

якщо виконується умова $n_{21}^2 > n_{31}$, де відносні значення показників заломлень $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, $n_{31} = \frac{n_3}{n_1}$,

$$z = [2n_{31}^4 (n_{21}^2 - 1) - n_{21}^6 (n_{31}^2 - 1)]^2 + 4n_{31}^6 (n_{21}^2 - 1)^2 (n_{21}^4 - n_{31}^2).$$

Якщо відносні показники заломлень знаходяться в інтервалах

$$1 < n_{21} < 1.0525, \text{ коли } n'_{31} < n_{31} < n''_{31}, \quad (9, \text{ а})$$

$$n_{21} < 1, \text{ коли } n''_{31} < n_{31} < n_{21}, \quad (9, \text{ б})$$

то умова (7) виконуватиметься при кутах α_{psBr1} , α_{psBr2} і

$$\alpha_{psBr3} = \arctg \sqrt{\frac{2n_{21}^2 n_{31}^2 (n_{21}^4 - n_{31}^2)}{2n_{31}^4 (n_{21}^2 - 1) - n_{21}^6 (n_{31}^2 - 1) - \sqrt{z}}}, \quad (10)$$

як це зображено на рис.1,2.

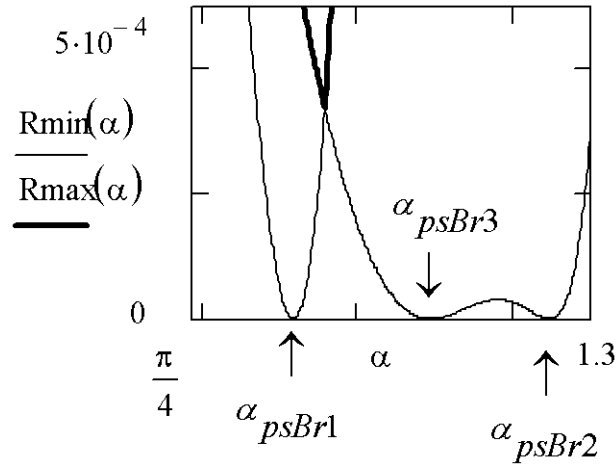


Рис. 1. Кутова залежність обвідних $R_{\min, \max}(\alpha)$ для структур із співвідношенням показників заломлень (9, а) і (9, б)

Для випадку, коли

$$n_{21} < 1, \text{ але } n_{21} < n_{31} < n'''_{31}, \quad (11)$$

мінімум обвідної, в якому виконується псевдобрюстерівська кутова умова, проявлятиметься для кутів

$$\alpha_{psBr1} \text{ та } \alpha_{psBr3}. \text{ Тут } n'_{31} = \sqrt{2\sqrt[3]{S} \cos\left(\frac{A+4\pi}{3}\right) + H}, \quad n''_{31} = \sqrt{2\sqrt[3]{S} \cos\left(\frac{A}{3}\right) + H}, \quad n'''_{31} = \frac{n_{21}}{\sqrt{1-n_{21}^2}},$$

$$\cos A = -\frac{q}{S}, \quad S = \sqrt{-\left[\frac{[n_{21}^8 + 4n_{21}^2(n_{21}^2 - 1)]^2}{12^2(n_{21}^2 - 1)^2} + \frac{n_{21}^8}{6(n_{21}^2 - 1)}\right]^3}, \quad H = \frac{n_{21}^8 + 4n_{21}^2(n_{21}^2 - 1)}{12(n_{21}^2 - 1)},$$

$$q = -\frac{[n_{21}^8 + 4n_{21}^2(n_{21}^2 - 1)]^3}{12^3(n_{21}^2 - 1)^3} + \frac{n_{21}^8 [n_{21}^8 + 4n_{21}^2(n_{21}^2 - 1)]}{48(n_{21}^2 - 1)^2} - \frac{n_{21}^8}{8(n_{21}^2 - 1)}$$

Якщо відносні показники заломлення знаходяться в інтервалах

$$n_{21} < 1 \text{ і } n_{31} > n'''_{31}, \quad (12)$$

то умова (7) виконуватиметься лише для одного кута α_{psBr3} . Для випадку коли $n_{21}^2 < n_{31}$, але умови (9а), (9б), (11) і (12) не виконуються, мінімум обвідної проявляється тільки для кута падіння α_{psBr1} . Як бачимо із (8, а), при цьому куті виконується класична Брюстерівська кутова умова для підкладки без плівки на її поверхні.

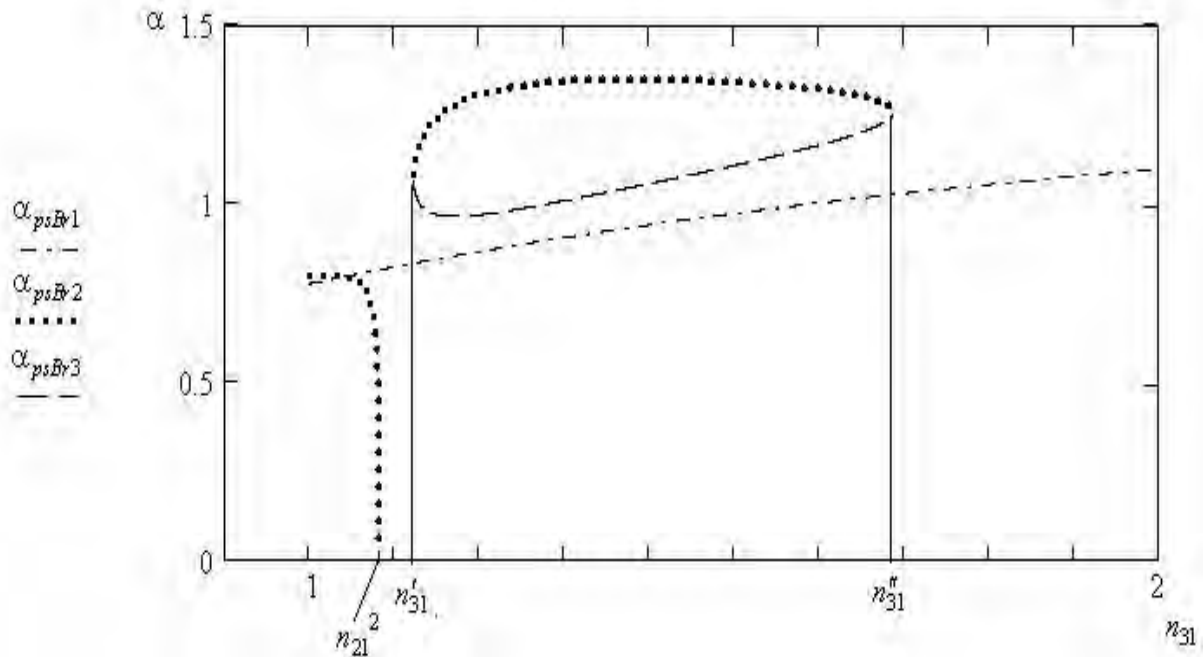


Рис. 2. Залежність псевдобрюстерівських кутів α_{psBr1} , α_{psBr2} і α_{psBr3} від відносного показника заломлення n_{31} при $n_{21} = 1.04$

В s -поляризації також не заборонена псевдобрюстерівська кутова умова (7). Відповідний кут дорівнює

$$\alpha_{ssBr} = \arctg \left(\sqrt{\frac{n_{31}^2 - n_{21}^4}{(n_{21}^2 - 1)^2}} \right), \quad (13)$$

якщо відносні показники заломлення знаходяться в інтервалах $n_{31} > n_{21}^2$, коли $n_{21} > 1$ або $n_{21} > n_{31} > n_{21}^2$, коли $n_{21} < 1$.

Висновки

1. Мінімум контуру похилого відбивання світла плівкою можна спостерігати в p - і s -поляризаціях і має інтерференційне походження.
2. При куті Брюстера для одинарної межі розділу, обвідні R_{\max} і R_{\min} за відсутності поглинання дотикаються в одній точці.
3. Рівність модулів амплітуд Френеля для протилежних меж шару є умовою прояву псевдоефекту Брюстера в спектрах Фабрі-Перо.
4. Кутове положення мінімуму обвідної мінімумів енергетичних коефіцієнтів відбивання не залежить від товщини плівки і визначається співвідношенням показників заломлень середовищ, що утворюють одноплівкову структуру, і виражає собою псевдоефект Брюстера для бінарної межі, який, на відміну від одинарної межі, не заборонений для обох p - та s -поляризацій.

Висловлюю подяку П.Кособуцькому за обговорення результатів роботи.

1. Surdutovich G.I., Vitlina R. Z. and Baranauskas V. // *Thin Solid Films.*—1999.— 355–356.— P. 446–450
2. Кособуцький П.С., Моргуліс А. // *УФЖ.*— 2004. — 49. — №12. — С. 1163–1169
3. Кособуцький П.С., Моргуліс А. // *Опт. журнал.* — 2004. — 71. — №12. — С. 63–68.