

Marian NOWAK

WPLYW NIEJEDNORODNOŚCI CIENKICH WARSTW I NIEPEŁNEJ KOHERENCYJNOŚCI PROMIENIOWANIA NA TRANSMISJĘ OPTYCZNĄ

Streszczenie. Zmiany grubości cienkiej warstwy w obszarze objętym badaniami, zmiany współczynnika załamania światła oraz niemonochromatyczność używanego promieniowania powodują zmiany fazy promieniowania przechodzącego przez cienką warstwę. W artykule porównano wpływ liniowego i gaussowskiego rozkładu tych zmian fazy promieniowania na widmowe charakterystyki transmisji optycznej.

INFLUENCE OF THIN FILM INHOMOGENITY AND INCOHERENCE OF LIGHT ON OPTICAL TRANSMITTANCE

Summary. The thickness variation, surface roughness, variation in refractive index, and bandwidth of illumination wavelength range evoke some change in phase of radiation traversing a thin film. The consequences of linear and gaussian distributions, over the illuminated sample area, of this change in phase of radiation on spectral characteristics of optical transmittance are presented.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТОНЬКИХ ПЛЕНОК И НЕПОЛНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ СВЕТА НА ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ

Резюме. Смены толщины тонкой пленки в освещенной области, смены показателя преломления и немонохроматическость излучения находятся причинами смены фазы излучения, который проходит через эту пленку. Предложено влияние линейного и гаусовского разложений этих смен фазы на спектральные характеристики оптического пропускания.

1. Wstęp

Duże znaczenie dla mikroelektroniki, optoelektroniki oraz optyki ma wyznaczanie parametrów optycznych (n – części rzeczywistej współczynnika załamania, k – współczynnika absorpcji promieniowania elektromagnetycznego) oraz grubości cienkich warstw różnych materiałów, np. półprzewodników. Jednym ze sposobów dokonywania tego jest pomiar i odpowiednie opracowanie widmowych charakterystyk transmisji optycznej badanych warstw.

Swanepoel [1] opublikował metodykę opracowywania wyników badań transmisji optycznej, w której założył następujące przypadki: (a) badana cienka warstwa może posiadać niejednakową grubość w różnych miejscach, (b) promieniowanie padające na próbkę nie jest monochromatyczne, lecz posiada składowe o długościach zawierających się w przedziale $\Delta\lambda$, (c) badana warstwa jest niejednorodna pod względem wartości części rzeczywistej swojego współczynnika załamania promieniowania. Praca Swanepoela dokonała znacznego postępu w dziedzinie badań transmisji optycznej cienkich warstw. Jednak jej podstawowym ograniczeniem jest założenie o liniowym rozkładzie Γ w obszarze próbki objętym badaniami transmisji optycznej (Γ oznacza zmianę fazy promieniowania przebywającego w cienkiej warstwie drogą równą podwójnej grubości tej warstwy). Założenie to powoduje, iż wypadkową transmisję oblicza się zgodnie ze wzorem

$$T_L = \frac{1}{\Gamma_2 - \Gamma_1} \int_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} T(\Gamma) d\Gamma \quad (1)$$

gdzie

$$\Gamma = \frac{4\pi wn}{\lambda}, \quad (2)$$

$T(\Gamma)$ – teoretyczna transmisja promieniowania przez próbkę obliczona przy założeniu danej wartości Γ .

Tymczasem można oczekiwać, iż zmiany grubości i współczynnika załamania promieniowania w badanej warstwie są przypadkowe oraz że rozkład natężenia promieniowania po długościach fal promieniowania elektromagnetycznego padającego na próbkę ma charakter gaussowski. W konsekwencji wypadkowa transmisja powinna być obliczana zgodnie ze wzorem

$$T_G = \int_0^{+\infty} \frac{T(\Gamma)}{\sigma_\Gamma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0.5 \left(\frac{\Gamma_o - \Gamma}{\sigma_\Gamma} \right)^2 \right] d\Gamma, \quad (3)$$

gdzie Γ_o – najbardziej prawdopodobna zmiana fazy promieniowania przy przejściu w warstwie półprzewodnika drogi równej dwukrotnej grubości tej warstwy, σ – wariancja rozkładu zmian fazy Γ .

Celem niniejszej pracy jest zbadanie, jaki jest wpływ przyjmowanego rozkładu zmian Γ na zależność widmową obliczanej efektywnej transmisji optycznej cienkich warstw.

2. Opis teoretyczny

Zalóżmy, podobnie jak w pracy [1], iż badana próbka składa się z płaskorównoległej, jednorodnej, izotropowej, nie absorbującej promieniowania płytki podłożowej o grubości w_2 spełniającej zależność

$$\Delta\lambda \gg \frac{\lambda^2}{2n_2w_2} \quad (4)$$

(n_2 – współczynnik załamania promieniowania w materiale płytki podłożowej).

Nierówność (4) jest warunkiem pomijalności zjawiska interferencji fal wielokrotnie odbitych we wnętrzu tej płytki [2].

Zakładamy, iż na czolowej powierzchni płytki podłożowej znajduje się cienka, płaskorównoległa, jednorodna, izotropowa warstwa materiału o parametrach optycznych n oraz k . Przy tym grubość tej warstwy w spełnia nierówność

$$\Delta\lambda \ll \frac{\lambda^2}{2nw}. \quad (5)$$

Z warunku (5) wynika konieczność uwzględnienia interferencji promieniowania wielokrotnie odbitego w tej warstwie [2].

Promieniowanie jednorodnie oświetlające powierzchnię XZ próbki pada na nią prostopadle i jest pochłaniane w kierunku osi Y. Współczynnik absorpcji promieniowania w warstwie półprzewodnika wynosi $k_1 = k$. Próbka znajduje się w powietrzu ($n_o = n_3 = 1$, $k_3 = 0$). Transmisja optyczna takiej próbki wyraża się wzorem [1]

$$T = \frac{A}{B - Cx \cos \Gamma + Dx^2} \quad (6)$$

gdzie

$$\begin{aligned} A &= 16n^2n_2, & B &= (n+1)^3(n+n_2^2), \\ C &= 2(n^2-1)(n^2-n_2^2), & D &= (n-1)^3(n-n_2^2), \\ x &= \exp(-kw), & \Gamma &= \frac{4\pi wn}{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

Określona wzorem (6) wielkość transmisji optycznej T może zostać wykorzystana we wzorach (1) i (3) do obliczenia efektywnych transmisji optycznych T_L oraz T_G .

Względna niepewność Γ wyraża się wzorem

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = \frac{\Delta w}{w} + \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (8)$$

Najczęściej podstawowym przyczynkiem niepewności w przypadku badań transmisji cienkich warstw jest przyczynek związany z niejednorodnością ich grubości. Wobec tego w dalszej części niniejszej pracy przyjmujemy

$$\frac{\sigma_\Gamma}{\Gamma} = \frac{\sigma_w}{w}, \quad (9)$$

gdzie σ_w – wariancja rozkładu zmian grubości warstwy w oświetlonym obszarze próbki. Tym samym we wzorze (3) zastosujemy podstawienie

$$\frac{\Gamma_o - \Gamma}{\sigma_\Gamma} = \frac{w_o - w}{\sigma_w}, \quad (10)$$

3. Dyskusja wyników

W celu przeanalizowania wpływu przyjmowanego rozkładu zmian Γ na zależność widmową efektywnej transmisji optycznej cienkich warstw wykonano obliczenia numeryczne, których wyniki są przedstawione w postaci wykresów na rys. 1 do 4. Obliczenia zostały wykonane przy założeniu widmowego rozkładu $n(\lambda)$ części rzeczywistej współczynnika załamania, jaki wyznaczono eksperymentalnie w pracy [3] dla cienkiej warstwy amorficznego krzemu na standardowym, grubym podłożu Corning Glass 7059. Jedynie przy obliczaniu charakterystyk porównawczych przedstawionych na rys. 4 założono teoretyczną zależność $n_i(\lambda) = n(\lambda) + 0,1$.

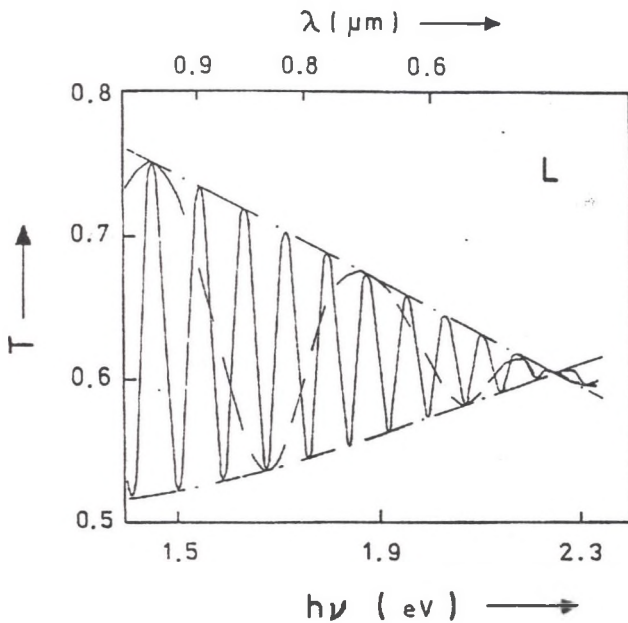
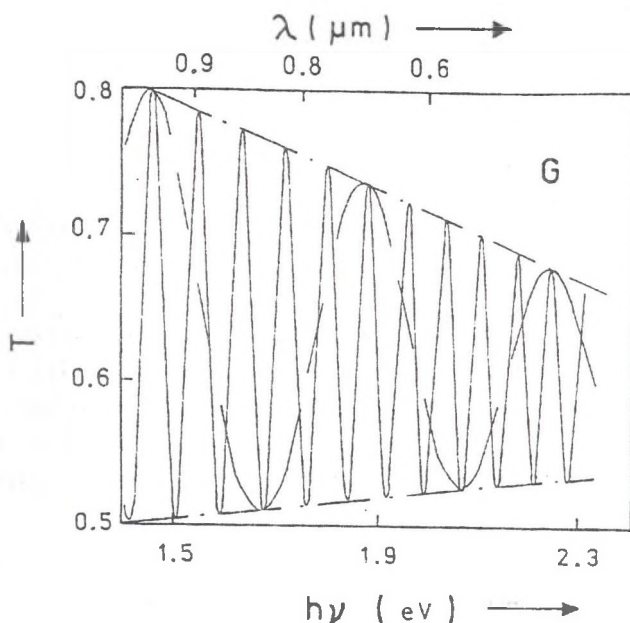


Fig. 1a
Rys. 1a



Rys. 1. Wpływ grubości cienkich warstw na grubym podłożu na widmowe zależności efektywnej transmisji optycznej obliczone dla liniowego (L) i gaussowskiego (G) rozkładu zmian Γ (krzywa przerywana: $w = 0,4 \mu\text{m}$; krzywa ciągła $w = 2 \mu\text{m}$; $\Delta w = 40\text{nm}$, $\sigma_w = 20\text{nm}$, $n(\lambda)$ wg [3], $k(\lambda) = 0$; odpowiednie krzywe łańcuchowe pokazują obwiednie krzywych transmisji)

Fig. 1. Influence of thin film thickness on spectral characteristics of optical transmittance calculated for linear (L) and gaussian (G) distribution of Γ (broken curve - $w = 0.4 \mu\text{m}$; solid curve - $w = 2 \mu\text{m}$; $\Delta w = 40\text{nm}$, $\sigma_w = 20\text{nm}$, $n(\lambda)$ taken from [3], $k(\lambda) = 0$; chain curves represent the appropriate envelopes of the characteristics)

Ponieważ z punktu widzenia badań efektów interferencyjnych najciekawszy zakres zmian transmisji optycznej występuje w zakresie długości fal, dla których absorpcja jest znikoma w badanym materiale, założono, iż $k(\lambda) = 0$.

Jako wartość współczynnika załamania promieniowania w płytce podłożowej, na której naniesiona jest cienka warstwa, przyjęto we wszystkich przypadkach $n_2 = 1,51$.

Na wykresach przedstawionych na rys. 1 widoczne są charakterystyczne piki interferencyjne widma transmisji optycznej zarówno dla liniowego, jak i dla gaussowskiego rozkładu zmian Γ . Znamienny jest fakt, iż w obydwóch przypadkach grubość cienkiej warstwy wpływa na odległości między pikami interferencyjnymi, lecz nie ma żadnego wpływu na kształt obwiedni, a tym samym transmisji. Kształt tych obwiedni, a tym samym transmisja optyczna próbki silnie natomiast zależy od zmian grubości cienkiej warstwy w obszarze

objętym badaniami transmisji optycznej (rys. 2). Jednak w tym wypadku zachodzi istotna różnica pomiędzy widmowymi charakterystykami efektywnych transmisji optycznych obliczonych dla liniowego i gaussowskiego rozkładu zmian Γ . W przypadku tego ostatniego rozkładu wartość transmisji optycznej przy ustalonych wartościach współczynnika załamania i długości fali promieniowania jest monotoniczną funkcją wariancji σ_w rozkładu zmian fazy Γ (rys. 3b).

Tymczasem w przypadku uwzględnienia liniowego rozkładu zmian Γ wartość transmisji optycznej przy ustalonych wartościach współczynnika załamania i długości fali promieniowania jest niemonotoniczną funkcją zmian grubości cienkiej warstwy Δw w obrębie oświetlonej powierzchni (rys. 3a). Rzutuje to na kształt obwiedni widmowych charakterystyk transmisji oraz oczywiście na same wartości transmisji optycznej (rys. 1a i 2a). Fakt wystąpienia podobnego jak te z rys. 1a i 2a przewężenia na krzywych obwiedni transmisji optycznej obliczonej dla liniowego rozkładu zmian Γ został przedstawiony także na rys. 2 w pracy [1]. Został on wówczas wyeliminowany z dalszych rozważań poprzez przyjęcie warunku małych wartości Δw [1]

$$\Delta w < \frac{\lambda}{4n}. \quad (11)$$

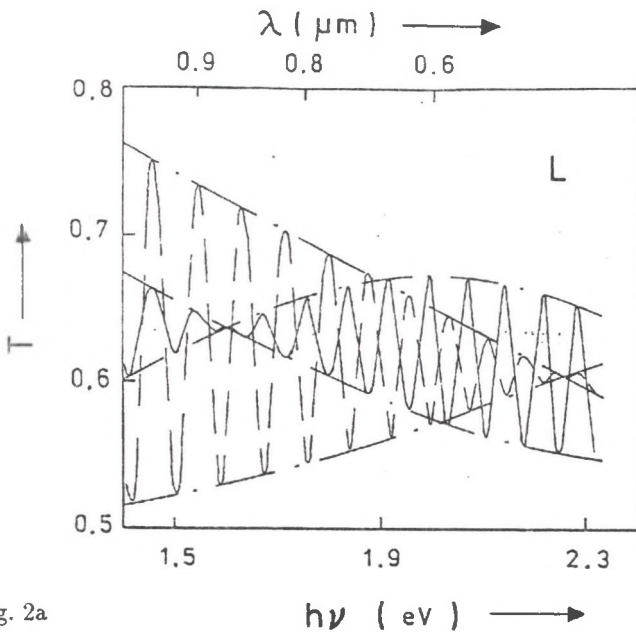
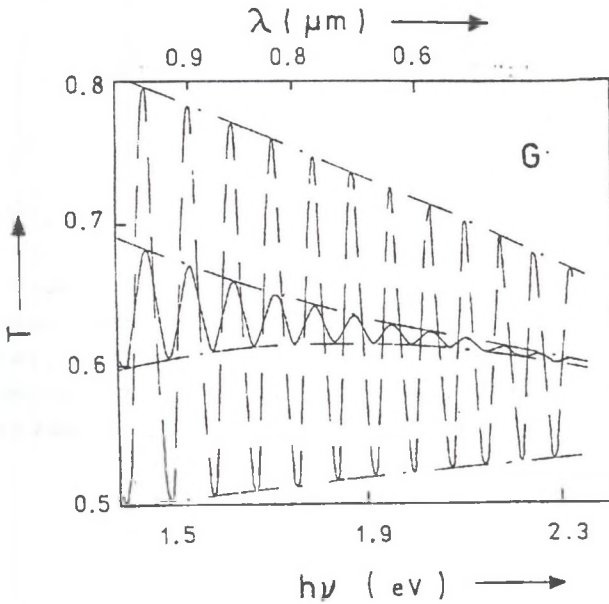


Fig. 2a
Rys. 2a



Rys. 2. Wpływ zmian grubości w obszarze próbki objętym badaniami cienkich warstw na grubym podłożu na widmowe zależności efektywnej transmisji optycznej obliczone dla liniowego (L) i gaussowskiego (G) rozkładu zmian Γ (L: krzywa przerywana - $w = 40 \text{ nm}$, krzywa ciągła - $\Delta w = 60 \text{ nm}$; G: krzywa przerywana - $\sigma_w = 20 \text{ nm}$, krzywa ciągła - $\sigma_w = 40 \text{ nm}$; $w = 2 \mu\text{m}$, $n(\lambda)$ wg [3], $k(\lambda) = 0$; odpowiednie krzywe łańcuchowe pokazują obwiednie obliczonych krzywych transmisji)

Fig. 2. Influence of thickness changes in illuminated area of thin film on spectral characteristics of optical transmittance calculated for linear (L) and gaussian (G) distribution of Γ (L: broken curve - $\Delta w = 40 \text{ nm}$; solid curve - $\Delta w = 60 \text{ nm}$; G: broken curve - $\sigma_w = 20 \text{ nm}$, solid curve - $\sigma_w = 40 \text{ nm}$; $w = 2 \mu\text{m}$, $n(\lambda)$ taken from [3], $k(\lambda) = 0$; chain curves represent the appropriate envelopes of the characteristics)

Tym samym metodyka opracowania wyników badań transmisji została znacznie ograniczona. W przypadku $n = 3,19$ i $\Delta w = 60 \text{ nm}$ wspomniana metodyka nie może być stosowana dla fal o długościach większych niż $0,768 \mu\text{m}$.

Najistotniejszy jest fakt, iż w literaturze nie spotyka się danych doświadczalnych na temat opisanego przewężenia obwiedni widmowych charakterystyk transmisji. Tymczasem fala o długości $\lambda = 1,03 \mu\text{m}$ leży w obszarze znikomej absorpcji promieniowania w a-Si:H, a równocześnie $\Delta w = 60 \text{ nm}$ to zaledwie 3% grubości $w = 2 \mu\text{m}$ lub jeszcze mniejsza część grubości warstw a-Si:H, jakie są poddawane badaniom oraz znajdują różne zastosowania praktyczne.

Nie spotyka się także danych na temat obserwacji gwałtownych perturbacji (patrz np. krzywa ciągła na rys. 2a) w sekwencji kolejnych maksimów i minimów na charakterystykach widmowych transmisji optycznej cienkich warstw w obszarze fal nie absorbowanych w badanym materiale. Zaobserwowanie takich perturbacji stanowiłoby oprócz zaobserwowania samego przewężenia obwiedni krzywej transmisji podstawowy dowód występowania w danym przypadku liniowego rozkładu zmian Γ w badanych próbkach.

Znamienny dla widmowych charakterystyk efektywnej transmisji optycznej obliczonej dla gaussowskiego rozkładu zmian Γ jest następujący fakt. Wartości transmisji w minimach pików interferencyjnych mogą wzrastać wraz ze zmniejszaniem się długości fali światła (rys. 1b, 2a i 4). Może to także występować w przypadku efektywnej transmisji optycznej obliczonej dla liniowego rozkładu zmian Γ . W pracy [1] przyjęto taki przebieg zmian na widmowej krzywej transmisji za dowód potwierdzający występowanie zmian grubości cienkiej warstwy w obszarze próbki, dla którego przeprowadza się badania transmisji optycznej.

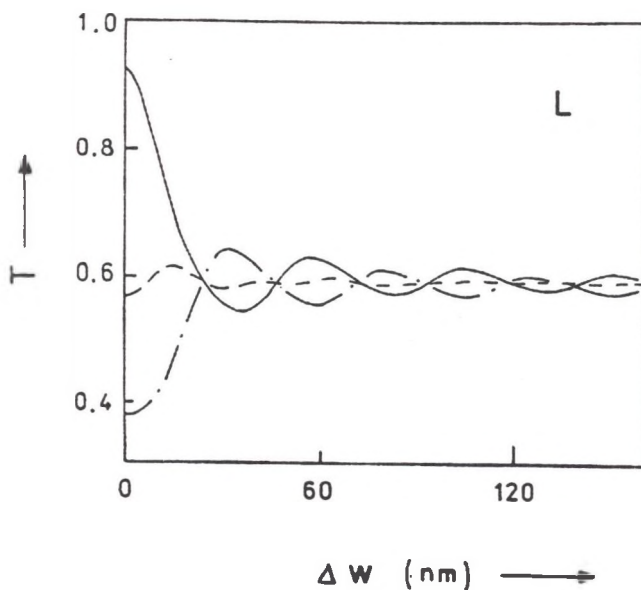
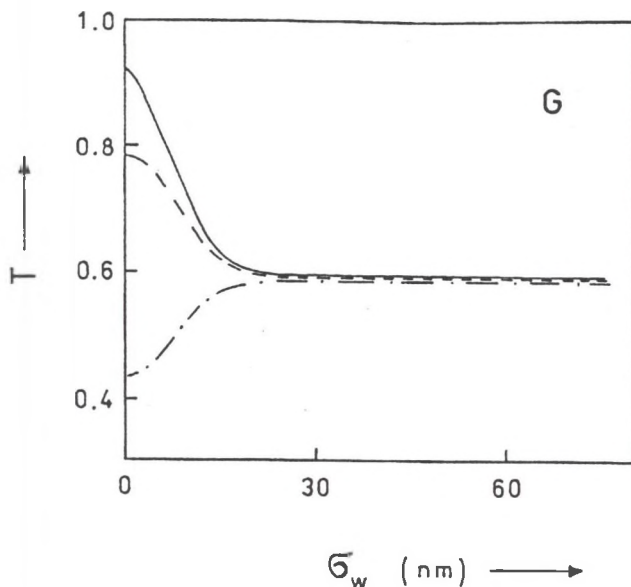


Fig. 3a

Rys. 3a



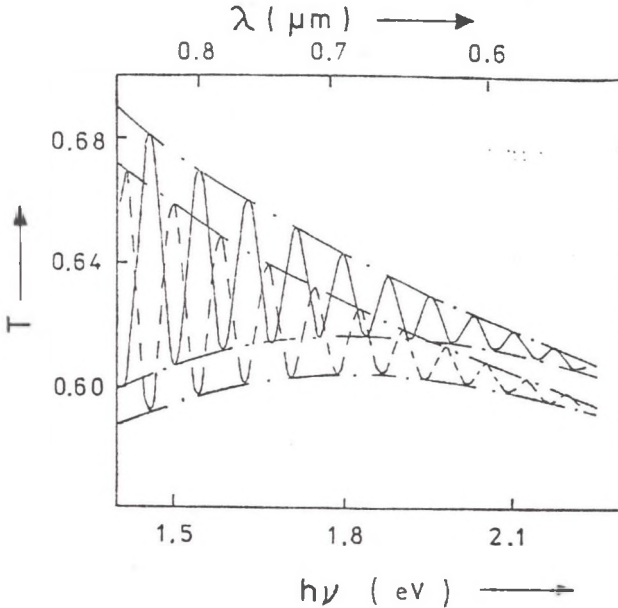
Rys. 3. Wpływ parametrów Δw i σ_w liniowego (L) i gaussowskiego (G) rozkładu zmian Γ na transmisję optyczną (krzywa ciągła: $- wn/\lambda = 10$; krzywa przerywana $- wn/\lambda = 10.11$; krzywa łańcuchowa $- wn/\lambda = 10.23$; $k = 0$, $\Delta n = 0$, $\Delta \lambda = 0$)

Fig. 3. Influence of the parameters Δw and σ_w of linear (L) and gaussian (G) distribution of Γ on optical transmittance of a thin film (solid curve $- wn/\lambda = 10$; broken curve $- wn/\lambda = 10.11$; chain curve $- wn/\lambda = 10.23$; $k = 0$, $\Delta n = 0$, $\Delta \lambda = 0$)

Rysunek 4 przedstawia charakterystyki widmowe efektywnej transmisji optycznej obliczone dla gaussowskiego rozkładu zmian Γ przy założeniu różnych wartości części rzeczywistej zespolonego współczynnika n załamania światła w badanym materiale. Wzrost n powoduje obniżenie obwiedni widmowej krzywej transmisji.

4. Wnioski

Najistotniejszymi wnioskami wynikającymi z zaprezentowanych rozważań są następujące stwierdzenia. Zaobserwowanie perturbacji w sekwencji kolejnych maksimów i minimum na krzywych widmowych zależności transmisji optycznej cienkich warstw w obszarze fal nie absorbowanych w badanym materiale (patrz np. krzywa ciągła na rys. 2a) stanowiłoby dowód występowania w danym przypadku liniowego rozkładu zmian Γ w badanych próbkach. Takim samym dowodem byłoby zaobserwowanie przewężenia obwiedni krzywej transmisji (patrz rys. 1a i 2a).



Rys. 4. Wpływ części rzeczywistej zespolonego współczynnika załamania w cienkiej warstwie na widmowe zależności efektywnej transmisji optycznej obliczone dla gaussowskiego rozkładu zmian Γ (krzywa ciągła - $n(\lambda)$ wg [3]; krzywa przerywana - $n(\lambda)$ wg [3] powiększone o 0.1; $w = 2 \mu m$, $\sigma_w = 40 nm$, $k(\lambda) = 0$; odpowiednie krzywe łańcuchowe pokazują obwiednie obliczonych krzywych transmisji)

Fig. 4. Influence of real part of refractive index of thin film on spectral characteristics of optical transmittance calculated for gaussian distribution of Γ (solid curve - $n(\lambda)$ taken from [3]; broken curve - $n(\lambda)$ from [3] increased with 0.1; $w = 2 \mu m$, $\sigma_w = 40 \mu m$, $k(\lambda) = 0$, $\Delta n = 0$, $\Delta \lambda = 0$; chain curves represent the appropriate envelopes of the characteristics)

Gdy zakładamy liniowy rozkład zmian Γ , to w przypadku cienkich warstw o dowolnych grubościach nie można na podstawie obwiedni widmowej charakterystyki transmisji optycznej w sposób jednoznaczny określić zmiany grubości w obszarze próbki objętym badaniami.

Wartości transmisji optycznej mogą wzrastać w minimach pików interferencyjnych wraz ze zmniejszaniem się długości fali światła zarówno w przypadku efektywnej transmisji optycznej obliczonej dla liniowego, jak i gaussowskiego rozkładu zmian Γ (czyli zmian w , n lub λ) w obszarze próbki objętym badaniami.

Założenie rozkładu Gaussa zmian Γ może pozwolić w sposób jednoznaczny wyznaczyć wariacje zmian grubości cienkich warstw o dowolnych grubościach na podstawie dopasowania wielkości teoretycznych do obwiedni oszacowanej na podstawie doświadczalnie zaobserwowanej widmowej charakterystyki transmisji optycznej.

Ten ostatni wniosek został wykorzystany w pracy [4] do opracowania nowej metodyki wyznaczania grubości próbki, jej wariancji zmian w obszarze próbki objętej badaniami transmisji, widmowych zależności n oraz k cienkich warstw półprzewodnika na grubym podłożu na podstawie zmian transmisji optycznej próbki ze zmianą długości fali światła.

Niniejszy artykuł powstał w ramach pracy BK-545/RMF-1/92 na Politechnice Śląskiej.

Literatura

- [1] R. Swanepoel, J. Phys. E: Sci. Instrum. **17** (1984), 898.
- [2] M. Born, E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press, London 1970.
- [3] V. Augelli, R. Murri, M. Nowak, Phys. Rev. B **39**, **12** (1989), 8336.
- [4] M. Nowak, *Metoda wyznaczania optycznych i geometrycznych parametrów cienkich warstw na podstawie widmowych badań transmisji optycznej*, Zeszyty Naukowe Politech. Śląsk. Mat.-Fiz. (w tym tomie).

Recenzent: Prof. dr hab. Sławomir Kończak

Wpłynęło do redakcji 20.04.1994 r.

Abstract

It is very probable that the changes of film thickness and refractive index are random as well as the distribution of radiation intensity over the wavelength range is gaussian. Therefore the change Γ in phase of radiation traversing a thin film is gaussian. Due to this although the affective optical transmittance of a thin film on a thick, parallel-sided, transparent substrate has the gaussian distribution over the illuminated sample area. The consequences of linear and gaussian distributions of the change in phase of radiation

traversing a thin film on spectral characteristics of optical transmittance are presented in this paper. Radiation wavelength bandwidth $\Delta\lambda$ and changes of thin film thickness (described by σ_w) and refractive index Δn in the illuminated area of a sample decrease the interference fringes in spectral characteristics of optical transmittance. Moreover, in the spectral range of negligible absorption of radiation the values of interference maxima decrease while the minima can increase, attain maximum and then decrease with decreasing radiation wavelength. Taking into account gaussian distribution of the change in phase Γ of radiation traversing a thin film makes the envelopes of theoretical spectral dependence of transmittance more smooth, and more comparable with experiment data than the theory assuming linear distribution Γ .