

Technika elipsometrii spektroskopowej jako metoda monitorowania jakości powierzchni materiałów grupy $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwość zastosowania techniki elipsometrii spektroskopowej do szybkiego i nieinwazyjnego monitorowania jakości powierzchni fotorefrakcyjnych kryształów $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$. Przedstawiono model optyczny materiału z chropowatą warstwą powierzchniową, który umożliwi precyzyjne wyznaczenie wielkości nierówności powierzchni w procesie dopasowania symulowanych krzywych teoretycznych oraz eksperymentalnych funkcji optycznych. Otrzymane wielkości stopnia chropowatości przy pomocy techniki elipsometrii zbliżone są do odpowiednich uzyskanych techniką mikroskopii sił atomowych.

Abstract. The article presents the capabilities of spectroscopic ellipsometry as a fast and nondestructive tool for monitoring of surface quality of photorefractive $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ crystals. Optical model with surface roughness layer is shown which allows to determine precisely the values of surface roughness in the fitting procedure of modeled and experimental optical functions. The obtained surface roughness quantities by spectroscopic ellipsometry and atomic force microscopy are in good agreement. (**Spectroscopic ellipsometry as a technique for surface quality monitoring of $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ materials**).

Słowa kluczowe: elipsometria, elipsometria spektroskopowa, chropowatość powierzchni, SBN.

Keywords: ellipsometry, spectroscopic ellipsometry, surface roughness, SBN.

doi:10.12915/pe.2014.09.07

Wprowadzenie

Obecny, dynamiczny postęp w dziedzinie materiałów elektronicznych wymusza stosowanie nowych i nieustannie ulepszanie istniejących metod i narzędzi wytwarzania oraz charakteryzacji tychże materiałów. Wśród całej palety dostępnych technik, ze względu na swą względną prostotę, możliwość z reguły szybkiej, precyzyjnej i nieinwazyjnej charakteryzacji szeregu własności fizyko-chemicznych materiałów, optyczne metody spektroskopowe pełnią szczególną rolę.

Elipsometria spektroskopowa (ES, ang. *spectroscopic ellipsometry*), jest współcześnie jednym z najpotężniejszych narzędzi wykorzystywanym do badań własności optycznych i strukturalnych materiałów. Technika ta bazuje na pomiarze zmiany stanu polaryzacji światła po odbiciu od powierzchni badanej próbki do precyzyjnego i nieinwazyjnego wyznaczenia parametrów optycznych materiału w szerokim zakresie widmowym, typowo od obszaru podczerwieni, do nadfioletu. Szczególną cechą techniki ES jest jej wysoka czułość – powierzchniowe warstwy grubości pojedynczych warstw atomowych istotnie wpływają na mierzone widma eksperymentalne. Dzięki temu, ES jest szczególnie predysponowana do badań własności materiałów niskowymiarowych. Ta cecha, w połączeniu z faktem, że określane parametry optyczne ściśle związane są z własnościami strukturalnymi materii, decyduje o uniwersalności metody i możliwości zastosowania w wielu dziedzinach techniki.

Jakość uzyskiwanych materiałów pełni kluczową rolę w przemyśle elektronicznym. To od niej, w dużej mierze, zależy niezawodność urządzeń. Stopień chropowatości powierzchni istotnie wpływa na funkcjonalność materiałów optoelektronicznych – zbyt duży powoduje straty w natężeniu oraz depolaryzację światła w wyniku rozpraszania. W związku z tym, istotne jest systematyczne monitorowanie jakości powierzchni uzyskiwanych materiałów optoelektronicznych.

W prezentowanej pracy pokazane są możliwości zastosowania techniki ES jako szybkiej i nieinwazyjnej metody badania jakości powierzchni materiałów grupy niobianu strontowo-barowego $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ (SBN: x , gdzie $0,25 \leq x \leq 0,75$). Materiał ten jest fotorefrakcyjnym kryształem tlenkowym z rodziny ferroelektryków

bezołowiowych, budzącym zainteresowanie dla aplikacji optoelektronicznych ze względu przede wszystkim na swój nadzwyczaj wysoki współczynnik elektro-optyczny (r_{33} do ~ 1400 pm/V [1]) – parametr ten jest około 50 razy większy od odpowiedniego dla kryształu $LiNbO_3$, będącego aktualnie podstawowym materiałem dla zastosowań elektro-optycznych w przemyśle [2]. Nieliniowo optyczne własności tego materiału czynią go atrakcyjnym dla takich zastosowań jak, przykładowo, pamięci optyczne (holograficzne) [3, 4], oraz przede wszystkim w obszarze telekomunikacji światłowodowej (sprzęgacze optyczne [5], modulatory [6], solitony optyczne [7, 8], generacja drugiej i trzeciej harmonicznej światła [9]).

Podstawy teoretyczne

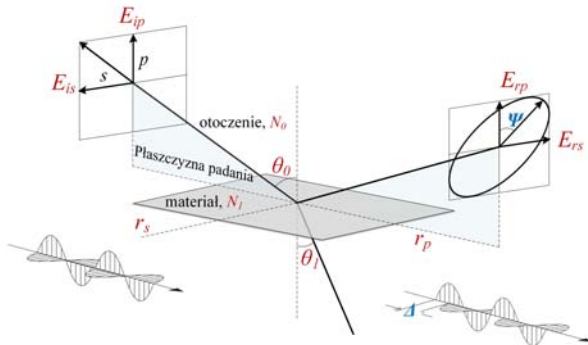
Bezpośrednim zadaniem pomiaru elipsometrycznego jest określenie elipsy stanu polaryzacji (czemu technika zawdzięcza swą nazwę) światła odbitego od powierzchni badanego materiału. Mierzona próbka oświetlana jest pod określonym kątem θ_0 światłem o znanej polaryzacji. Generalnie, idea pomiaru elipsometrycznego bazuje na fakcie, że składowe pola elektrycznego spolaryzowanej płaskiej fali elektromagnetycznej (światła), równoległa E_p i prostopadła E_s do płaszczyzny padania światła (rys. 1), dla θ_0 większego niż 0° oraz mniejszego niż 90° odbijają się w inny sposób. Wynikowy stan polaryzacji światła opisywany jest przy pomocy pary tzw. parametrów elipsometrycznych (Ψ , Δ), które definiowane są przez zespolone współczynniki Fresnela r_p , r_s , dla odpowiednio p - i s - polaryzacji:

$$(1) \quad \rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{\tan \Psi_p}{\tan \Psi_s} e^{i(\Delta_p - \Delta_s)} = \tan \Psi e^{i\Delta}$$

gdzie Ψ , Δ przedstawiają odpowiednio współczynnik amplitudowy oraz różnicę fazową pomiędzy składowymi polami elektrycznymi w kierunku p - oraz s -.

Współczesne, komercyjnie dostępne elipsometry bazują zwykle na konfiguracji tzw. obracanego analizatora (rys. 2). Pierwotnie niespolaryzowane światło zostaje spolaryzowane liniowo, najczęściej przy pomocy dwójłomnego polaryzatora krystalicznego. Komputerowo sterowany drugi polaryzator, pełniący funkcję analizatora,

obracać się „skanuje” elipsę stanu polaryzacji. Światło o zmodulowanym natężeniu pada na detektor półprzewodnikowy. Wynikowy sygnał elektryczny poddawany jest analizie Fouriera celem wyznaczenia wielkości (Ψ, Δ) [10].

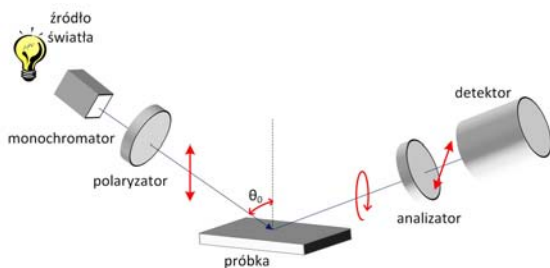


Rys.1. Idea pomiaru elipsometrycznego

Parametry (Ψ, Δ) bezpośrednio związane są z zespolonym współczynnikiem załamania światła $N = n + ik$ (zespoloną przenikalnością elektryczną $\epsilon = N^2$) poprzez zależność:

$$(2) \quad \langle N^2 \rangle = \langle \epsilon \rangle = \sin^2 \theta_0 \left[1 + \tan^2 \theta_0 \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \right]$$

Wyznaczona z zależności (2) dyspersja przenikalności elektrycznej nosi miano funkcji pseudo-dielektrycznej lub efektywnej funkcji dielektrycznej i oznaczana jest nawiasami ostrymi. Ma to związek z tym, że zależność (2) określona jest przy założeniu odbicia sondującego światła na granicy tylko jednego ośrodka o idealnej powierzchni. Wobec tego, obliczona według równania (2) zależność dyspersyjna współczynnika załamania światła reprezentuje badaną próbkę jako całość, tj. wraz z ewentualnymi niedoskonałościami powierzchni.



Rys.2. Podstawowa konfiguracja elipsometru z obracającym analizatorem

Model optyczny chropowatości powierzchni

Jak przedstawiono wyżej, na funkcje pseudo-dielektryczne $\epsilon(E)$ uzyskane bezpośrednio z pomiaru widm elipsometrycznych istotny wpływ ma jakość powierzchni. Oznacza to, że zmierzone widma zawierają informację na temat nie tylko parametrów optycznych samego materiału, lecz również jakości powierzchni mierzonej próbki. Kluczowe staje się więc wyekstrahowanie tej informacji z uzyskiwanych widm. Do tego celu konieczne jest wykorzystanie warstwowego modelu optycznego odpowiednio dokładnie reprezentującego próbkę pomiarową. Generalnie, proces analizy elipsometrycznych

danych eksperymentalnych można określić jako rozwiązanie problemu odwrotnego, a mianowicie takiego dopasowania parametrów modelu, aby wygenerowane krzywe teoretyczne były zgodne z widmami eksperymentalnymi.

W technice elipsometrii, chropowatość powierzchni reprezentowana jest w modelu teoretycznym badanego materiału jako jednorodna warstwa (rys. 3), której własności optyczne opisane są przy pomocy teorii EMT (ang. *effective medium theory*). Ten sposób przedstawienia parametrów optycznych (przenikalności elektrycznej) warstwy powierzchniowej wywodzi się z rozwiązania równania Clausiusa-Mossotti dla materiałów wieloskładnikowych (kompozytowych), przy założeniu sferycznych dielektryków jednego lub więcej materiałów zawartych w macierzy innego materiału [11]:

$$(3) \quad \frac{\epsilon_r - \epsilon_h}{\epsilon_r + 2\epsilon_h} = f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_r}{\epsilon_a + 2\epsilon_r} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon_r}{\epsilon_b + 2\epsilon_r} + \dots$$

gdzie $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_h$ oraz f_a, f_b oznaczają odpowiednio przenikalności elektryczne i udział objętościowy materiału a oraz b wtrąconego do materiału h, ϵ_r wypadkową (makroskopową) przenikalność dielektryczną. Bazując na ogólnym równaniu (3), zaproponowano różne podejścia opisu parametrów optycznych materiałów mieszanych [11, 12]. W przypadku modelowania chropowatości powierzchni gładkich, gdy oczekiwana wartość współczynnika chropowatości R_q (miara średniokwadratowa odchylenia profilu powierzchni od linii średniej) jest wielokrotnie mniejsza w porównaniu z długością fali sondującego światła, najczęściej stosowanym jest model Bruggemana, w którym $\epsilon_r = \epsilon_h$ [10]:

$$(4) \quad 0 = f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_r}{\epsilon_a + 2\epsilon_r} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon_r}{\epsilon_b + 2\epsilon_r}$$

W powyższym modelu, określanym mianem EMA (ang. *effective medium approximation*), f_a ($f_b = 1 - f_a$) reprezentuje prawdopodobieństwo znalezienia materiału a oraz materiału b w sferycznym dielektryku [13], niezależniąc tym samym wypadkową przenikalność elektryczną materiału wieloskładnikowego od wyboru materiału otoczenia.



Rys.3. Sposób modelowania chropowatości powierzchni w technice elipsometrii: schematyczna ilustracja próbki pomiarowej (z lewej) oraz odpowiadający jej warstwowy model optyczny (z prawej)

Równanie (4) może zostać zapisane w następującej formie [14, 15]:

$$(5) \quad \epsilon_r^2 + z\epsilon_r - \frac{\epsilon_a\epsilon_b}{2} = 0$$

gdzie:

$$(6) \quad z = \frac{(f-2)\epsilon_b + (1-2f)\epsilon_a}{2(f+1)}, \quad f = \frac{f_a}{f_b}$$

dla którego rozwiązaniem jest para zespolona:

$$(7) \quad \text{Re}[\epsilon_r] = \frac{1}{2} (-\text{Re}[z] + \text{Re}[\sqrt{z^2 + 2\epsilon_a\epsilon_b}])$$

$$(8) \quad \text{Im}[\varepsilon_r] = \frac{1}{2}(-\text{Im}[z] + \text{Re}[\sqrt{z^2 + 2\varepsilon_a\varepsilon_b}])$$

Zakładając przenikalność elektryczną otoczenia równą 1 (powietrze lub próżnia) i przyjmując zwyczajowo parametr $f = 0,5$, zespoloną przenikalność elektryczną modelowanej warstwy chropowatości powierzchni można zapisać w następującej, uproszczonej formie [16]:

$$(9) \quad \text{Re}[\varepsilon_r] = \frac{1}{8}(1 + \text{Re}[\varepsilon_s] + \text{Re}[\varepsilon_s] + \text{Re}[\sqrt{1 + 34\varepsilon_s + \varepsilon_s^2}])$$

$$(10) \quad \text{Im}[\varepsilon_r] = \frac{1}{8}(-\text{Im}[\varepsilon_s] + \text{Re}[\sqrt{1 + 34\varepsilon_s + \varepsilon_s^2}])$$

gdzie ε_s oznacza zespoloną przenikalność elektryczną materiału podłoża.

Z powyższych rozważań wynika, że ogólnie modelowane chropowatości powierzchni traktować można jako warstwę powierzchniową o przenikalności elektrycznej ε_r będącą pewną wypadkową przenikalności elektrycznej samego materiału i jego otoczenia, a wielkość chropowatości można interpretować jako grubość modelowanej warstwy (rys. 3). Tak więc, określenie stopnia chropowatości sprowadza się do wyznaczenia parametru d_r w procesie dopasowania krzywych eksperymentalnych i teoretycznych odpowiedzi optycznej próbki wyznaczonych przy pomocy 3-fazowego modelu: otoczenie/warstwa chropowata/próbka (rys. 3). Współczynnik elipsometryczny $\rho = r_p/r_s$ omawianego modelu może być wyznaczony rozważając odbicie światła lokalnie na każdym złączu i sumując „wychodzące” promienie światła [17]:

$$(11) \quad \rho_{012} = \frac{r_{01p} + r_{12p}e^{i2\beta}}{1 + r_{01p}r_{12p}e^{i2\beta}} \frac{1 + r_{01s}r_{12s}e^{i2\beta}}{r_{01s} + r_{12s}e^{i2\beta}}$$

gdzie $r_{01p/s}$, $r_{12p/s}$ są zespolonymi współczynnikami odbicia dla p - i s - spolaryzowanego światła na granicy ośrodków, odpowiednio: złącza otoczenie/warstwa chropowata (medium 0 i 1) oraz warstwa/materiał (medium 1 oraz 2):

$$(12) \quad r_{01p} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_0 - \cos \theta_1}{\sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_0 + \cos \theta_1}$$

$$(13) \quad r_{01s} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_0 - \sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_1}{\cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_1}$$

$$(14) \quad r_{12p} = \frac{\sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_2}$$

$$(15) \quad r_{12s} = \frac{\sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_2}$$

gdzie $\theta_{0/1/2}$ oznaczają odpowiednie kąty padania i załamania światła jak pokazano na rysunku 3, a $e^{i2\beta}$ określa zmianę fazy fali światła powodowaną różnicą dróg optycznych sumowanych promieni:

$$(16) \quad \beta = 2\pi \frac{d_r}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_0}$$

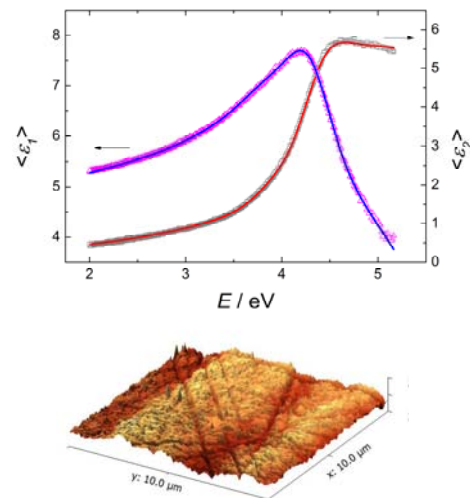
gdzie λ jest długością fali światła.

Podstawiając równanie (14) do równań (12) – (15) a następnie do równania (11), możliwe jest wyznaczenie krzywych teoretycznych odpowiedzi optycznej $\rho_{012} = \tan \Psi e^{i\Delta}$

modelu. Zakładając znane dane zespolonej przenikalności elektrycznej materiału ε_s oraz zespoloną przenikalność elektryczną warstwy chropowatej ε_r daną wzorami (9) oraz (10), pozostaje wyznaczenie jedynego nieznanego parametru modelu – grubości warstwy chropowatej d_r , w procesie dopasowania krzywych modelowych i eksperymentalnych.

Wyznaczanie wielkości chropowatości powierzchni materiałów SBN

Przedstawiony wyżej model optyczny został wykorzystany do wyznaczenia wielkości chropowatości powierzchni na podstawie spektroskopowych pomiarów elipsometrycznych, przy pomocy komercyjnego elipsometru SENTECH SE-801 i w zakresie spektralnym energii fotonu 2–5 eV. Do badań wybrano 5 próbek SBN o różnym składzie kompozycyjnym: $x = 40; 50; 61; 65; 75$. Przykładowe zmierzone widmo $\langle \varepsilon \rangle(E)$ dla SBN:61 przedstawiają symbole na rysunku 4.



Rys.4. Część rzeczywista $\langle \varepsilon_1 \rangle$ i urojona $\langle \varepsilon_2 \rangle$ zmierzonej przykładowej funkcji pseudo-dielektrycznej (symbole) dla SBN:61 (płaszczyzna padania światła równoległa do osi krystalograficznej c) i odpowiednie krzywe modelowe (linie) oraz, poniżej, przykładowy obraz topograficzny AFM dla tej samej próbki (skanowana powierzchnia $10 \times 10 \mu\text{m}$)

Widma teoretyczne, wyznaczone na podstawie opisanego modelu optycznego, zostały następnie dopasowane do krzywych eksperymentalnych przy pomocy algorytmu Lavenberga-Marquadta [18] przyjmując d_r jako parametr zmienny. Jako ε_s przyjęto dane zespolonej przenikalności elektrycznej wyznaczone w pracy [19]. Otrzymane wartości d_r zestawione są w tabeli 1. Dane te zostały porównane z wielkościami R_q uzyskanymi przy pomocy mikroskopu sił atomowych AFM (Park System) dla tych samych próbek (tryb bezkontaktowy). Wyniki uzyskane obiema metodami są generalnie zbliżone, co potwierdza skuteczność techniki elipsometrii w charakteryzowaniu stopnia chropowatości powierzchni SBN.

Tabela 1. Zestawienie wyznaczonych wielkości grubości warstwy chropowatej d_r techniką elipsometrii oraz współczynnika chropowatości R_q przy pomocy AFM. W nawiasach wartości błędów średniokwadratowego dopasowania MSE

próbka	d_r [nm]	R_q [nm]
SBN:40	1,80 (0,04)	1,72
SBN:50	2,33 (0,07)	2,35
SBN:61	5,16 (0,03)	5,68
SBN:65	1,62 (0,05)	1,4
SBN:75	2,50 (0,05)	2,7

Podsumowanie

W prezentowanej pracy pokazano możliwość zastosowania techniki spektroskopii elipsometrycznej jako szybkiej i nieinwazyjnej optycznej metody wyznaczania stopnia chropowatości powierzchni rzędu nm w materiałach $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$. Przedstawiono model optyczny badanej próbki, który w procesie dopasowania zmierzonych widm eksperymentalnych i modelowych umożliwia precyzyjne wyznaczenie wielkości grubości warstwy chropowatej d_r . Uzyskane wartości parametrów d_r zbliżone są do odpowiednich wielkości określających stopień chropowatości R_q uzyskanych przy pomocy mikroskopu sił atomowych.

W badaniach mierzone były widma optyczne w całym zakresie dostępnym w typowych elipsometrach spektroskopowych. Pomiar taki, w zależności od wybranej rozdzielczości pomiaru, z reguły trwa od kilkudziesięciu sekund do kilku minut. Zaznaczyć jednak należy, że ograniczenie punktów pomiarowych nie powinno negatywnie wpłynąć na precyzję wyznaczania parametrów d_r . Co więcej, biorąc pod uwagę, że w procesie dopasowania krzywych eksperymentalnych i teoretycznych wyznaczany jest tylko jeden parametr, możliwe wydają się pomiary elipsometryczne dla tylko jednej długości światła. Takie rozwiązanie korzystnie wpłynęłoby na uproszczenie układu pomiarowego (zastosowanie np. lasera jako źródła światła) oraz pozwoliło uzyskać szybkość pomiaru rzędu pojedynczych sekund. To jednakże pozostanie przedmiotem oddzielnych badań.

Prezentowane tutaj zastosowanie techniki elipsometrii ma charakter uniwersalny, co oznacza, że z powodzeniem może być stosowane również do charakteryzowania stopnia chropowatości innych powierzchni gładkich. Ograniczeniem techniki jest to, że może ona być zastosowana do charakteryzowania powierzchni, których stopień chropowatości nie przekracza $\sim 0,3$ długości fali sondującego światła [20].

LITERATURA

- [1] Lenzo P.V., Spencer E.G., Ballman A.A., Electro-optic coefficients of ferroelectric strontium barium niobate, *Appl. Phys. Lett.*, 11 (1967), n.23, 23-24
- [2] Miotello A., Ossi P.M., *Laser Interactions for New Materials Production*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [3] Hasselink L., Bashaw M., Optical memories implemented with photorefractive media, *Opt. Quant. Electron.*, 25 (1993), n.9, S611-S661

- [4] Wood C., Salamo G.J., Wood G.L., Anderson R.J., McGee D.J., Fixed three-dimensional holographic images, *Appl. Opt. Am.*, 41 (2002), n.32, 6796-6801
- [5] Weber M.J., *Handbook of optical materials*, CRC Press, 2003.
- [6] Liu W.C., Mak C.L., Wong K.H., Thermo-optic properties of epitaxial $Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb_2O_6$ waveguides and their application as optical modulator, *Opt. Express*, 17 (2009), n.16, 13677-13685
- [7] Wolfersberger D., Tranca D., 2D Infrared self-focusing in bulk photorefractive SBN, *Opt. Express*, 1 (2011), n.7, 1178-1184
- [8] Zhang P., Zhao J.L., Lou C., Tan X.Y., Gao Y.H., Liu Q., Yang D.X., Xu J.J., Chen Z.G., Elliptical solitons in nonconventionally biased photorefractive crystals, *Opt. Express*, 15 (2007), n.2, 536-544
- [9] Molina P., Ramírez M.O., Bausá L.E., Strontium barium niobate as a multifunctional two-dimensional nonlinear "photonic glass", *Adv. Funct. Mater.*, 18 (2008), n.5, 709-715
- [10] Fujiwara H., *Spectroscopic Ellipsometry, Principles and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., 2007
- [11] Aspnes D.E., Optical properties of thin-films, *Thin Solid Films*, 89 (1982), n.3, 249-262
- [12] Tompkins H.G., Irene E.U., *Handbook of ellipsometry*, William Andrew Publishing, Springer-Verlag GmbH Co. KG, 2005.
- [13] Niklasson G.A., Granqvist C.G., Hunderi O., Effective medium models for the optical-properties of inhomogeneous materials, *Appl. Opt.*, 20 (1981), n.1, 26-30
- [14] Röseler A., *Infrared spectroscopic ellipsometry*, Akademie-Verlag, Berlin, 1990
- [15] Tompkins H.G., *A User's Guide to Ellipsometry*, Academic Press, San Diego, 1993
- [16] Cobet C., *Linear optical properties of III-nitride semiconductors between 3 and 30 eV*, praca doktorska, Berlin, 2005
- [17] Azzam R.M.A., Bashara N.B., *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland Personal Library, New York, 1987
- [18] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., *Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002
- [19] Dorywalski K., Andriyevsky B., Cobet C., Piasecki M., Kityk I.V., Esser N., Łukasiewicz T., Patryn A., Ellipsometric study of near band gap optical properties of $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ crystals, *Opt. Mater.*, 35 (2013), n.5, 887-892
- [20] Lee J., Rovira P.I., Collins R.W., Rotating-compensator multichannel ellipsometry: Application for real time Stokes vector spectroscopy of thin film growth, *Rev. Sci. Instrum.*, 69 (1998), 1800-1810

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Dorywalski, Politechnika Koszalińska, Instytut Technologii i Edukacji, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: krzysztof.dorywalski@tu.koszalin.pl; prof. dr hab. inż. Aleksy Patryn, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: patryn@weii.tu.koszalin.pl.