



Właściwości elektryczne i optyczne cienkich warstw WO_x wytwarzanych metodą rozpylania magnetronowego i analiza ich współczynnika doskonałości

JULIA DYBAŁA, MICHAŁ MAZUR

Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów,
ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław, julka.dybala@wp.pl, michal.mazur@pwr.edu.pl

Streszczenie. W artykule przeanalizowano właściwości optyczne i elektryczne cienkich warstw tlenku wolframu. Jest to materiał często stosowany między innymi w inteligentnych oknach, lustrach antyparowych i czujnikach gazów. Zbadano pięć serii cienkich warstw tlenku wolframu, które zostały wytworzone w procesach rozpylania magnetronowego w atmosferze mieszaniny gazu roboczego (Ar) oraz reaktywnego (O_2) o różnej zawartości tlenu, tj. od 5% do 15%. Każdy z procesów przeprowadzany był przy tej samej wartości ciśnienia, odległości target – podłoże oraz w tym samym czasie. Grubość cienkich warstw zmierzona za pomocą profilometru optycznego wynosiła około 160 nm. Zauważono, że wraz ze zwiększaniem się udziału gazu reaktywnego w procesie próbki zmieniały barwę od metalicznej, przez ciemnogrnatową, po błękitną, jednocześnie stając się coraz bardziej przezroczyste. Pomiary właściwości elektrycznych wykonane za pomocą sondy czterostrzowej, a także właściwości optycznych przeprowadzone z użyciem spektrofotometru wykazały, że zwiększanie udziału tlenu w procesie powodowało wzrost średniej transmisji światła w zakresie widzialnych długości fal oraz rezystywności cienkich warstw. W artykule przeanalizowano również współczynniki *Figure of Merit* określające jakość badanej próbki. Największą wartość współczynnika doskonałości otrzymano dla cienkiej warstwy tlenku wolframu, odznaczającej się stosunkowo dużą średnią transmisją światła w zakresie widzialnym przy niskiej wartości rezystywności. Przeprowadzone badania wykazały, że atmosfera gazowa podczas procesu rozpylania magnetronowego istotnie wpływa na właściwości optyczne i elektryczne cienkich warstw tlenku wolframu, co stwarza możliwość projektowania cienkowarstwowych powłok przeznaczonych do stosowania w transparentnej elektronice.

Słowa kluczowe: rozpylanie magnetronowe, cienkie warstwy, tlenek wolframu, właściwości optyczne i elektryczne

DOI: 10.5604/01.3001.0016.2779

1. Wprowadzenie

Wolfram jest pierwiastkiem chemicznym o liczbie atomowej 74, o bardzo wysokiej temperaturze topnienia wynoszącej 3695 K. Metal ten wyróżnia się możliwością pracy w wysokich temperaturach, niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej, dobrą przewodnością ciepła i prądu elektrycznego oraz odpornością chemiczną [1]. Te właściwości sprawiły, że tlenki tego metalu są wykorzystywane w wytwarzaniu powłok cienkowarstwowych. Tlenek wolframu przybiera zarówno krystaliczną, jak i amorficzną strukturę. Układ krystalograficzny zależy od temperatury i przyjmuje struktury tetragonalne, rombowe oraz jednoskośne [2]. Wolfram może tworzyć grupy tlenków — WO_x , przy czym x wynosi najczęściej od 2 do 3. Pierwiastek ten ma kilka stopni utlenienia. Najbardziej znanymi są W^{6+} , W^{5+} i W^{4+} , przy czym każdy z nich ma swoje unikalne właściwości [3]. Tlenek na +6 stopniu utlenienia ma charakter kwasowy. Wraz ze zmniejszaniem się stopnia utlenienia właściwości stają się zasadowe [1].

Tlenki wolframu wykazują właściwości elektrochromowe, czyli możliwość zmiany barwy pod wpływem m.in. pola elektrycznego. Polega to na jednoczesnym zachodzeniu reakcji elektrochemicznych i optycznych. Zmiany barwy są w pełni odwracalne po usunięciu zewnętrznego bodźca [4]. Właściwości elektrochromowe odpowiadają za część zastosowań tlenku wolframu. Można go wykorzystać m.in. w inteligentnych oknach, urządzeniach o zmiennym współczynniku odbicia, urządzeniach wyświetlających [5]. Właściwości hydrofilowe oraz hydrofobowe tlenków wolframu sprawiają, że znajdują zastosowanie również przy produkcji lusterek antyparowych lub okularów antyrefleksyjnych [6]. Kolejną właściwością tego tlenku jest gazochromizm, czyli możliwość zmiany właściwości takich jak transmisja światła czy barwa pod wpływem zmiennych warunków atmosferycznych. Gazami wykrywanymi przez WO_3 są m.in. wodór, dwutlenek azotu, metanol, metan, tlenek siarki, amoniak [3]. WO_3 jest więc wykorzystywany jako warstwa czujnikowa ze względu na wysoką selektywność dla różnych gazów. Jest używany między innymi jako czujnik wykrywania wodoru [3].

Tlenek wolframu wytwarza się wieloma metodami, zarówno fizycznymi, jak i chemicznymi. Ich wybór zależy od właściwości, jakie chce się uzyskać, przygotowując daną próbkę. Można wyróżnić jedną z metod fizycznego osadzania z fazy gazowej — rozpylanie magnetronowe. Charakteryzuje się ono dużą czystością, szybkością, powtarzalnością procesu oraz jednorodnością [6], a także, dzięki możliwości szybkiej zmiany napylanego materiału, zdolnością do tworzenia powłok wielowarstwowych [3]. Dodatkowo nie wymaga wysokiej temperatury procesu, dzięki czemu warstwy można osadzać również na podłożach polimerowych typu PCV lub PET [1]. Wadą metody rozpylania magnetronowego jest możliwość zanieczyszczenia (np. utleniania) targetu, która znacznie zmniejsza tempo rozpylania [7]. Reaktywne rozpylanie

magnetronowe umożliwia tworzenie na podłożu związków chemicznych będących produktem reakcji napylanego materiału z targetu z gazem reaktywnym (najczęściej azotem lub tlenem). W ten sposób otrzymuje się tlenki bądź azotki metali, w tym omawiany tlenek wolframu [8].

W artykule określono, w jaki sposób zmiana atmosfery gazowej podczas rozpylania magnetronowego wpływa na właściwości cienkich warstw tlenku wolframu. Wskazano grubość, chropowatość, właściwości optyczne i elektryczne wytworzonych warstw oraz przeanalizowano otrzymane wyniki. Dodatkowo dołączono analizę współczynnika doskonałości (*Figure of Merit*).

2. Eksperyment

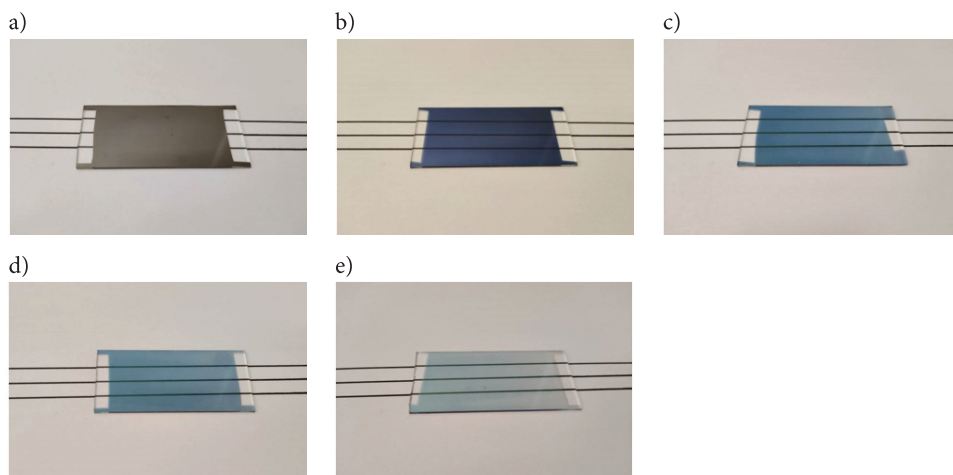
Cienkie warstwy zostały wytworzone metodą rozpylania magnetronowego z użyciem metalicznego targetu wolframu o czystości 99,95%. Każdy z procesów rozpylania magnetronowego został przeprowadzony przy ciśnieniu $1 \cdot 10^{-2}$ mbarów dla przepływu wynoszącego 40 sccm (suma przepływów tlenu i argonu). Magnetron z metalicznym targetem wolframu zasilany był ze źródła typu MKS2 DPS Dora Power System 1 kW, a współczynnik wypełnienia mocy w każdym procesie wynosił 100% PWM. Odległość target – podłoże (szkło mikroskopowe) wynosiła 16 cm, a czas trwania procesów to 10 minut. Wytworzono pięć serii cienkich warstw tlenków wolframu, a w każdym kolejnym procesie zmieniano jedynie atmosferę gazową, tj. stosunek gazu reaktywnego (tlenu) do gazu roboczego (argonu). Zawartość gazu reaktywnego w mieszaninie tlen-argon zmieniana była w zakresie od 5% do 15%.

W dalszej części artykułu użyto zaprezentowanych w tabeli 1 oznaczeń próbek, co pozwoliło na ich łatwiejszą identyfikację. Na zdjęciach na rysunku 1 widać wytworzone warstwy W1-W5, celem jest zobrazowanie przezroczystości próbek bądź ich braku. Wraz ze zwiększaniem się udziału gazu reaktywnego próbki stają się niebieskie i coraz bardziej przezroczyste.

TABELA 1

Oznaczenia próbek wykorzystanych w pracy

Oznaczenie	Zawartość tlenu w mieszaninie Ar:O ₂ (%)
W1	5
W2	7,5
W3	10
W4	12,5
W5	15



Rys. 1. Zdjęcia wytworzonych cienkich warstw tlenków wolframu: a) W1, b) W2, c) W3, d) W4, e) W5

3. Wyniki i dyskusja

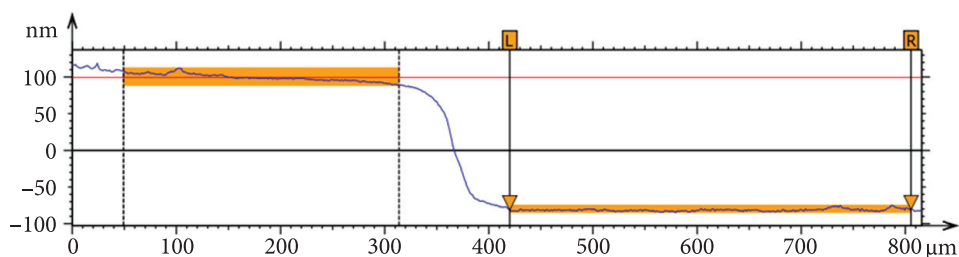
3.1. Analiza grubości i właściwości powierzchni

Grubość wytworzonych warstw tlenku wolframu zmierzono za pomocą profilometru optycznego firmy Taylor Hobson oraz oprogramowania TalySurf CCI Lite. Pozwoliło ono na wykonanie dwuwymiarowych i trójwymiarowych zdjęć powierzchni próbek oraz profili przekrojów badanych powierzchni, dzięki czemu można było zmierzyć grubość próbek. Wyniki zamieszczono w tabeli 2. Grubość cienkich warstw wynosi od około 160 nm do 181 nm. Na rysunku 2 przedstawiono profil przekroju powierzchni próbki W4, który pozwolił na określenie jej grubości.

TABELA 2

Grubości próbek W1-W5

Numer próbki	Grubość [nm]
W1	160,2
W2	165,1
W3	180,4
W4	181,0
W5	163,7



Rys. 2. Profil przekroju powierzchni próbki W4

3.2. Analiza właściwości optycznych i elektrycznych

Do analizy właściwości elektrycznych próbek, tj. rezystancji powierzchniowej każdej cienkiej warstwy, posłużyła sonda czterostrzowa. Dodatkowo obliczono ich rezystywność, zgodnie ze wzorami (1) oraz (2). Próbka W1, charakteryzująca się najmniejszym udziałem tlenu w procesie (5%), ma najmniejszą rezystancję powierzchniową. Wraz ze zwiększaniem się stosunku tlenu do argonu w procesie rozpylania magnetronowego zwiększa się rezystancja powierzchniowa próbek, osiągając wartość $2,58 \cdot 10^7 \Omega$ dla próbki W5. Wyniki zebrano w tabeli 3.

$$R_s = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R = 4,532 \cdot R \quad (1)$$

$$\rho = d(\text{cm}) \cdot R_s \quad (2)$$

TABELA 3

Pomiary elektryczne próbek W1-W5

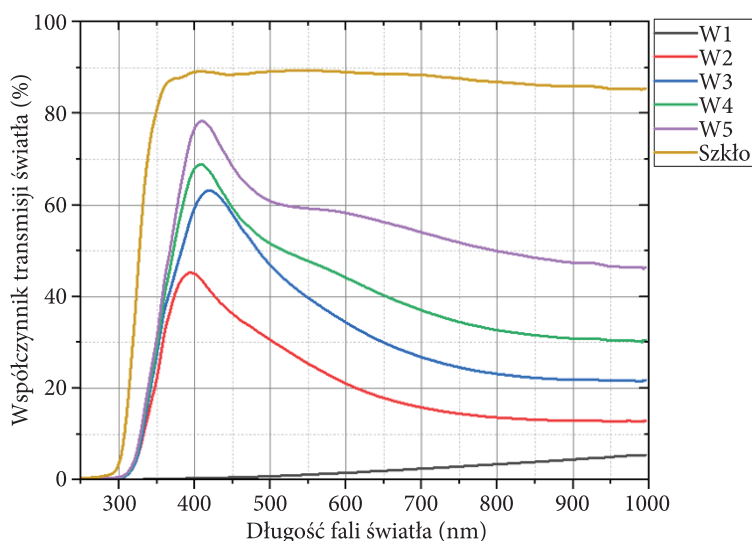
Numer próbki	Grubość d (nm)	Rezystancja powierzchniowa R_s (Ω)	Rezystywność ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)
W1	160,2	$3,60 \cdot 10^3$	$5,78 \cdot 10^{-2}$
W2	165,1	$8,42 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^{-1}$
W3	180,4	$1,08 \cdot 10^4$	$1,94 \cdot 10^{-1}$
W4	181	$8,24 \cdot 10^5$	$1,49 \cdot 10^1$
W5	163,7	$2,58 \cdot 10^7$	$4,22 \cdot 10^2$

Badanie właściwości optycznych cienkich warstw tlenku wolframu polegało na pomiarze transmisji światła każdej z nich z użyciem spektrofotometrii optycznej. W tym celu wykorzystano spektrofotometr Ocean Optics QE65000. Pomiarzy wykonywane były w zakresie spektralnym 250-1000 nm. Dodatkowo pomiary przeprowadzono dla podłoża szklanego będącego odniesieniem dla pozostałych wyników, odzwierciedlającym maksymalną możliwą do uzyskania transmisję światła przez próbkę. Na rysunku 3 znajduje się zestawienie widm transmisji światła dla każdej z warstw oraz podłoża szklanego. Wartość średniego współczynnika transmisji światła każdej próbki przedstawiono dla widzialnego zakresu fal światła, tj. w zakresie od 380 nm do 760 nm. W tym celu wyznaczono pole powierzchni pod wykresem (*Area*) w zadanym zakresie. Wartość średniej transmisji światła obliczono zgodnie z wzorem (3). Wyniki zestawiono w tabeli 4. Analiza tych wyników oraz charakterystyk pokazanych na rysunku 3 pozwoliła dostrzec, że wraz ze zwiększaniem się udziału tlenu w procesie rozpylania magnetronowego rośnie wartość transmisji światła. Tym samym próbki stają się bardziej przezroczyste. Próbka W1, która była wytwarzana przy najmniejszym udziale tlenu (5%), charakteryzuje się bardzo niską przezroczystością światła, rzędu 1%. Z kolei próbka W5, wytwarzana przy największym udziale tlenu (15%), charakteryzuje się przezroczystością światła ok. 60%, przy czym maksymalna możliwa do uzyskania transmisja światła przez próbkę wynosiła 88,5% (wartość dla podłoża ze szkła mikroskopowego).

$$T_{avr} = \frac{Area}{760-380} (\%) \quad (3)$$

TABELA 4
Wartości średnich transmisji optycznych dla próbek W1-W5 oraz podłoża szklanego

Nazwa próbki	T_{avr} (%)
W1	1,4
W2	25,8
W3	40,2
W4	47,9
W5	60,6
Podłoże szklane	88,5



Rys. 3. Zestawienie charakterystyk współczynnika transmisji światła w funkcji długości fali światła

3.3. Określenie współczynnika *Figure of Merit*

Współczynnik *Figure of Merit* (FoM) definiuje jakość badanej próbki. W przypadku cienkich warstw TOS lub TCO współczynnik doskonałości definiowany jest na podstawie rezystancji/ rezystywności oraz przezroczystości/ transmisji światła.

G. Haacke w artykule *New Figure of Merit for Transparent Conductors* [10] zaproponował zdefiniowanie współczynnika FoM równaniem (4). Wykładnik przy współczynniku transmisji światła zapewnia równowagę między transmisją optyczną a rezystancją powierzchniową warstwy. W artykule udowodniono bowiem, że duże współczynniki FoM, obliczone dla $x = 1$, występują nawet dla warstw, dla których współczynnik transmisji światła wynosi zaledwie 37%. Jest to zbyt niska wartość dla większości przezroczystych warstw przewodzących, ponieważ pochłaniane/odbijane byłoby prawie dwie trzecie światła. Tym samym można byłoby uznać, przez pryzmat współczynnika FoM, warstwę przewodzącą jako lepszą od drugiej, pomimo że jej absorpcja optyczna jest zbyt wysoka do zastosowań praktycznych [10].

$$\text{FOM}_1 = \frac{T^x}{R_s} \quad \text{dla } x > 1, \quad (4)$$

gdzie: T – współczynnik transmisji światła [%],

R_s – rezystancja powierzchniowa [Ω].

W artykule [10] jako najkorzystniejszy wybrany został wykładnik $x = 10$, ponieważ upraszcza obliczenia numeryczne i jest odpowiedni dla większości przezroczystych warstw przewodzących ze względu na fakt, że niewiele takich powłok wymaga transmisji większej niż 90%. Jako najbardziej odpowiedni zastosowano więc wzór (5):

$$FOM_2 = \frac{T^{10}}{R_s} \quad (5)$$

Aman Anand i in., na podstawie badań Cisneros-Contreras i in. wykazali, że wartość Haacke'a (FOM_3) była nieskuteczna dla elektrod przewodzących o małej przezroczystości [9]. Zmodyfikowano zatem proponowane równanie, aby zwiększyć FoM nawet o dwa rzędy wielkości przez powiększenie wagi transmisji optycznej w stosunku do rezystancji warstwy. W rezultacie zdefiniowano wzór FOM_3 (6) nazwą *FOM Haacke High Resolution* [9].

$$FOM_3 = \frac{T}{\sqrt[n]{R_s}} \quad (6)$$

gdzie rekomendowanym przez autorów wykładnikiem n jest 10.

Zaproponowanym przez autorów artykułu sposobem wyznaczania współczynnika FoM jest ten zaprezentowany w równaniu (7). Wykorzystuje on zależność średniej przezroczystości w zakresie widzialnym fal światła (tj. zakres od 380 nm do 760 nm) i rezystywności badanych próbek. W ten sposób określa się współczynnik doskonałości dla światła widzialnego i uniezależnia go od grubości przez zastosowanie rezystywności.

$$FOM_4 = \frac{T^{10}}{\rho} \quad (7)$$

gdzie: T – współczynnik transmisji światła,
 ρ – rezystywność [$\Omega \cdot \text{cm}$].

Wartości współczynnika FoM obliczone zgodnie z równaniami 4-7 wykazały, że istnieją wyraźne różnice w jakości badanych cienkich warstw w zależności od stosunku gazu reaktywnego do gazu roboczego podczas rozpylania magnetronowego. Wyniki zamieszczono w tabeli 5. Największą wartość współczynnika *Figure of Merit* w każdym przypadku zaobserwowano dla próbki W3 osadzonej w procesie z udziałem tlenu wynoszącym 10%. Jest to związane ze stosunkowo dużą średnią transmisją światła w zakresie widzialnym (40,2%) oraz niską rezystywnością (0,194 $\Omega \cdot \text{cm}$).

Pozostałe próbki charakteryzowały się dużymi wartościami rezystywności lub małą przezroczystością, co przekładało się na spadek współczynnika doskonałości.

TABELA 5

Wartości współczynników FoM dla próbek W1-W5

Numer próbki	T_{avr}	$R_s (\Omega)$	$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$	$\text{FOM}_1 (x = 2)$	FOM_2	FOM_3	FOM_4
W1	0,014	$3,60 \cdot 10^3$	$5,78 \cdot 10^{-2}$	$3,89 \cdot 10^{-6}$	$8,04 \cdot 10^{-23}$	$6,17 \cdot 10^{-3}$	$5,01 \cdot 10^{-18}$
W2	0,258	$8,42 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^{-1}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-10}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$
W3	0,402	$1,08 \cdot 10^4$	$1,94 \cdot 10^0$	$3,72 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$5,68 \cdot 10^{-4}$
W4	0,479	$8,24 \cdot 10^5$	$1,49 \cdot 10^1$	$5,81 \cdot 10^{-7}$	$7,72 \cdot 10^{-10}$	$1,23 \cdot 10^{-1}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$
W5	0,606	$2,58 \cdot 10^7$	$4,22 \cdot 10^2$	$2,35 \cdot 10^{-8}$	$2,59 \cdot 10^{-10}$	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$

4. Podsumowanie

Zbadano pięć cienkich warstw tlenku wolframu wytworzonych przy różnej atmosferze gazowej podczas procesu rozpylania magnetronowego, gdzie stosunek gazu reaktywnego (tlenu) do gazu roboczego (argonu) wynosił 5%, 7,5%, 10%, 12,5% oraz 15%. Każdy z procesów był przeprowadzany przy tej samej wartości ciśnienia, odległości target – podłoże oraz w tym samym czasie.

Wraz ze zwiększaniem się udziału gazu reaktywnego w procesie próbki zmieniły barwę i stawały się coraz bardziej przezroczyste. Stosunek gazu reaktywnego do roboczego istotnie wpłynął na wartość rezystancji powierzchniowej oraz rezystywności każdej z nich. Analiza wyników wykazała, że wraz ze zwiększaniem się stosunku tlenu do argonu w procesie rozpylania magnetronowego wartości rezystancji powierzchniowej oraz rezystywności próbek wzrastają, osiągając wartość największą dla próbki o najwyższym stopniu utlenienia. Zwiększanie udziału tlenu w procesie sprawia również, że próbki stają się bardziej przezroczyste, a tym samym wzrasta ich średnia transmisja światła w zakresie widzialnych długości fal.

Największą wartość współczynnika *Figure of Merit*, a tym samym najlepszą jakość, otrzymano dla cienkiej warstwy tlenku wolframu, odznaczającej się stosunkowo dużą średnią transmisją światła w zakresie widzialnym przy niskiej wartości rezystywności.

Przeprowadzone badania wykazały, że atmosfera gazowa, tj. stosunek gazu reaktywnego (tlenu) do gazu roboczego (argonu), podczas procesu rozpylania magnetronowego istotnie wpływa na właściwości optyczne i elektryczne cienkich warstw tlenku wolframu, co jest podstawą do przyszłych rozszerzonych badań na ten temat i stwarza możliwość projektowania cienkowarstwowych powłok przeznaczonych do stosowania w transparentnej elektronice.

Praca była współfinansowana ze źródeł Narodowego Centrum Nauki (NCN) jako projekt badawczy nr 2020/39/D/ST5/00424 w latach 2021-2024.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XXXVI Konferencji Elektroniki, Telekomunikacji i Energetyki Studentów i Młodych Naukowców SECON 2022 – zorganizowanej przez Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w dniach 26-27 kwietnia 2022 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 7.06.2022. Zatwierdzono do publikacji 25.08.2022.

Michał Mazur <https://orcid.org/0000-0002-6997-4204>

LITERATURA

- [1] WIERDAK B., POSADOWSKI W., WIATROWSKI A., *Otrzymywanie cienkowarstwowych układów elektrochromowych na bazie tlenku wolframu metodą magnetronowego rozpylania*, Elektronika: Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, 62, 3, 2021, 28-32.
- [2] YAMAMOTO A., ABE Y., KAWAMURA M., SASAKI K., *Effects of Oxygen Gettering and Target Mode Change in the Formation Process of Reactively RF Sputtered WO_x Thin Films*, Vacuum, 66, 3-4, 2002, 269-273.
- [3] MAZUR M., WOJCIESZAK D., WIATROWSKI A., KACZMAREK D., LUBAŃSKA A., DOMARADZKI J., MAZUR P., KALISZ M., *Analysis of Amorphous Tungsten Oxide Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering for Application in Transparent Electronics*, Applied Surface Science, 570, 2021, 151151.
- [4] GRANQVIST C.G., *Progress in Electrochromics: Tungsten Oxide Revisited*, Electrochimica Acta, 44, 1999, 3005-3015.
- [5] MADHAVI V., JEEVAN KUMAR P., KONDAIAH P., HUSSAIN O.M., UTHANNA S., *Effect of Molybdenum Doping on the Electrochromic Properties of Tungsten Oxide Thin Films by RF Magnetron Sputtering*, Ionics, 20, 2014, 1737-1745.
- [6] LUBAŃSKA A., MAŃKOWSKA E., MAZUR M., *Wybrane właściwości cienkich warstw tlenków wolframu wytwarzanych przy różnych warunkach procesu rozpylania magnetronowego*, Elektronika: Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, 61, 10, 2020, 10-12.
- [7] PARREIRA N.M.G., CARVALHO N.J.M., CAVALEIR A., *Synthesis, Structural and Mechanical Characterization of Sputtered Tungsten Oxide Coatings*, Thin Solid Films, 510, 2006, 191-196.
- [8] STEC A., *Sterowanie procesem reaktywnego rozpylania magnetronowego*, Pomiarzy Automatyka Kontrola, 51, 1, 2005, 53-55.
- [9] ANAND A., ISLAM M.M., MEITZNER R., SCHUBERT U.S., HOPPE H., *Introduction of a Novel Figure of Merit for the Assessment of Transparent Conductive Electrodes in Photovoltaics: Exact and Approximate Form*, Advanced Energy Materials, 11, 2021, 2100875.
- [10] HAACKE G., *New figure of merit for transparent conductors*, Journal of Applied Physics, 47, 1976, 4086.

J. DYBAŁA, M. MAZUR

Electrical and optical properties of the WO_x thin films, prepared by magnetron sputtering, and analysis of their highest value

Abstract. In this article, optical and electrical properties of tungsten oxide thin films, prepared by magnetron sputtering in the atmosphere of various oxygen content, were analysed. Tungsten oxide is a material, which is widely used in modern applications such as smart windows, anti-steam mirrors, and gas sensors. Five sets of tungsten oxide thin films were deposited by magnetron sputtering in the mixed argon-oxygen atmosphere composed of various content of reactive gas, i.e., from 5% to 15%. In each case, other deposition process parameters were the same. The thickness of the thin films was ca. 160 nm and it was measured with the optical profilometer. It was noticed that along with the increase in the proportion of reactive gas in the process, thin film samples changed their colour from metallic, through navy blue to blue and simultaneously they became increasingly transparent. Measurements of electrical properties, made using the four-point probe and optical properties, performed with the aid of a spectrophotometer showed that increasing the proportion of oxygen in the process increased the average transmission in the visible wavelength range and the resistivity of the prepared WO_x thin films. In the article, the Figure of Merit (FoM) coefficients are also presented, which determine the quality of the thin film samples. It was shown that the highest value of the FoM was observed for WO_x thin film characterised by a relatively high average transmission in the visible wavelength range and low value of resistivity. The performed measurements showed that the gas atmosphere during magnetron sputtering process leads to the tailoring of the optical and electrical properties of tungsten oxide thin films, which in turn makes it possible to design and apply such thin film coatings in transparent electronics.

Keywords: magnetron sputtering, thin films, tungsten oxide, optical and electrical properties

DOI: 10.5604/01.3001.0016.2779

