

## Badania odpowiedzi sensorowej cienkich warstw oraz nanostruktur SnO<sub>2</sub>

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań nad odpowiedzią na pobudzenie gazowe rezystancyjnych struktur czujnikowych z sensoryczną warstwą SnO<sub>2</sub>. Czulą na gazy warstwę sensorową wytworzono dwiema technologiami: reotaksjalnego wzrostu i termicznego utleniania (RGTO) i poprzez wzrost nanodrutów metodą termicznego osadzania z fazy gazowej. Klasyczną testową strukturę czujnikową poddano oddziaływaniu dwóch gazów: dwutlenku azotu o stężeniach 3, 8, 25, 80 i 240 ppm oraz wodoru o stężeniach 1500, 4000, 10000, 20000 i 40000 ppm, rejestrując odpowiedź warstwy sensorycznej pracującej w temperaturze 250°C i 300°C.

**Abstract.** The results of research on resistance sensor SnO<sub>2</sub> structures response to gas was presented in this work. Gas sensitive layer was fabricated using two technologies: RGTO and nanowire growth by thermal vapor deposition. Classic test sensor structure was subjected to two gases: nitrogen dioxide NO<sub>2</sub>, in concentration of 3 ppm, 8 ppm, 25 ppm, 80 ppm and 240 ppm, and hydrogen H<sub>2</sub>, in concentration of 1500 ppm, 4000 ppm, 10000 ppm, 20000 ppm and 40000 ppm, registering the response of sensor layer in temperature of 250 °C and 300 °C. (**Studies on sensor response of SnO<sub>2</sub> thin films and 1-D nanostructures**).

**Słowa kluczowe:** sensory, cienkie warstwy, nanostruktury SnO<sub>2</sub>, czujniki rezystancyjne, technologia RGTO, termiczne osadzanie z fazy gazowej.

**Keywords:** sensors, thin films, SnO<sub>2</sub> nanostructures, resistive gas sensors, RGTO technology, thermal vapor deposition.

### Wprowadzenie

Tematyka wytwarzania i charakteryzacji cienkich warstw SnO<sub>2</sub> jest ciągle aktualna, a liczba publikacji, jakie ukazują się w tej dziedzinie, jest znaczna. Wynika to z faktu, że dwutlenek cyny jest doskonałym materiałem czujnikowym o ogromnych możliwościach zastosowania w komercyjnych czujnikach [1-3]. Z drugiej strony materiał ten jest również bardzo ciekawy z poznawczego punktu widzenia. Ukazało się wiele prac, w których w kompleksowy sposób próbowano wyjaśnić mechanizmy odpowiedzialne za właściwości sensorowe tego typu materiału [4-8]. Celem prac, jakie prowadzone są systematycznie od wielu lat w Zakładzie Mikroelektroniki i Nanotechnologii Instytutu Elektroniki Politechniki Śląskiej, jest systematyczne pozyskiwanie nowych informacji o warunkach wytwarzania cienkich warstw dwutlenku cyny (SnO<sub>2</sub>) przy wykorzystaniu technologii reotaksjalnego wzrostu i termicznego utleniania RGTO oraz wzrostu nanodrutów SnO<sub>2</sub>, metodą termicznego osadzania z fazy gazowej, w aspekcie zastosowań sensorowych [9-12, 14-15]. Prowadzone prace miały na celu ocenę wpływu wybranych parametrów technologicznych na właściwości strukturalne oraz sensorowe wytworzonych warstw SnO<sub>2</sub>. Powinno to umożliwić określenie optymalnych parametrów technologicznych procesu wytwarzania cienkich warstw oraz nanostruktur SnO<sub>2</sub> dla celów konstrukcji czujnika gazów toksycznych. W niniejszej pracy skoncentrowano się zarówno na ocenie topografii powierzchni, jak i na analizie odpowiedzi gazowej własnych, modelowych struktur czujnikowych wykonanych w oparciu o techniki opisane szczegółowo we wcześniejszych pracach.

### Prace eksperymentalne

Aby wytworzyć warstwy SnO<sub>2</sub> o właściwościach sensorycznych zmodernizowano posiadane urządzenia technologiczne do potrzeb technologii RGTO. Wykonano reotaksjalne osadzanie cyny (o czystości 99,99% Sn) na ceramiczne podłoża alundowe, kontrolując temperaturę podłoża (270°C), a w następnym etapie wykonano utlenianie termiczne warstw cyny dobierając temperaturę procesu oraz stężenie tlenu. W obu etapach procesu kontrolowano morfologię powierzchni wytwarzanych próbek wykonując obra-

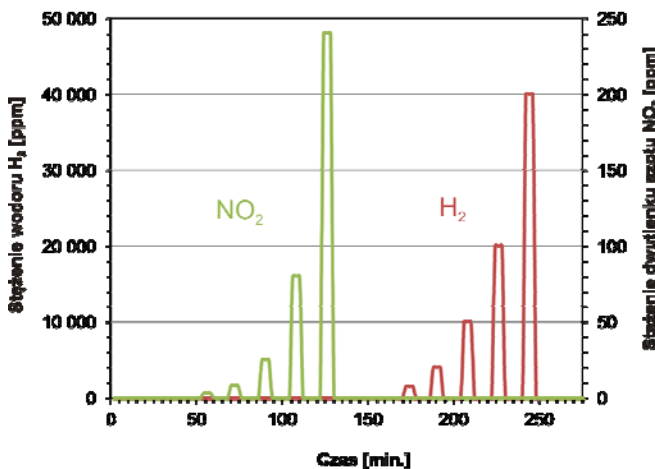
zy SEM. Szczegółowy opis opracowanej własnej technologii wytwarzania sensorycznych warstw dwutlenku cyny przy wykorzystaniu techniki reotaksjalnego osadzania i termicznego utleniania RGTO przedstawiono w pracach [9-12].

Drugim rodzajem badanych warstw były próbki uformowane w procesie termicznego wzrostu „jednowymiarowych” struktur – nanodrutów SnO<sub>2</sub> [13-14]. Wstępny etap wytwarzania tych struktur polegał na naniesieniu ultracienkiej warstwy złota (o czystości 99,99%), pełniącej rolę katalizatora, na podłożu krzemowe (Si), pokryte warstwą tlenku termicznego (SiO<sub>2</sub>) o grubości na poziomie około 100 nm. Tak przygotowane płytki umieszczano pionowo w kasecie kwarcowej, którą wprowadzono do kwarcowej komory pieca dyfuzyjnego o temperaturze 952°C (1225 K). Do komory tej wprowadzano również tygiel grafitowy wypełniony mieszaniną dwutlenku cyny i sproszkowanego grafitu w odpowiednim stężeniu molowym. Proces wzrostu nanodrutów SnO<sub>2</sub> prowadzono w czasie kilkudziesięciu minut w strumieniu przepływającego azotu z szybkością 3 dm<sup>3</sup>/min. Tak uformowane nanostruktury były dodatkowo dotleniane w komorze pieca dyfuzyjnego w atmosferze zawierającej tlen w temperaturze 700°C (973 K).

Badania topografii cienkich warstw RGTO-SnO<sub>2</sub> oraz warstw złożonych z nanodrutów SnO<sub>2</sub> wykonano z wykorzystaniem wysokorozdzielczego skaningowego mikroskopu elektronowego SUPRA 25 firmy ZEISS, wyposażonego w detektor rozproszonego promieniowania rentgenowskiego TRIDENT XM4 firmy EDAX, przy napięciu przyspieszającym od 5 do 20 kV.

Wytworzone według opisanej technologii warstwy stanowiły zasadniczy element modelowych struktur czujnikowych, które miały postać klasycznych struktur rezystancyjnych z sensoryczną warstwą SnO<sub>2</sub>. Złote elektrody, o odpowiedniej geometrii i grubości, osadzano klasyczną metodą parowania próżniowego przy wykorzystaniu masek mechanicznych. Wytworzone modelowe struktury czujnikowe pozwoliły na określenie podstawowych parametrów elektrycznych sensorów. Pomiary wykonywano na stanowisku do pomiarów gazowych umożliwiającym rejestrowanie zmian rezystancji testowych struktur czujnikowych poddanych oddziaływaniu

wybranych gazów. Niebezpieczne lub toksyczne gazy wprowadzano do komory pomiarowej za pomocą sterowanego komputerowo dozownika gazów, wyposażonego w kilka linii gazowych umożliwiających precyzyjne kształtowanie atmosfery w komorze pomiarowej dzięki zastosowanym masowym regulatorom przepływu (MFC). Pożądane stężenie uzyskiwano dzięki rozcieńczaniu gazów azotem. W przypadku dwutlenku azotu rozcieńczano mieszaninę syntetycznego powietrza i  $\text{NO}_2$  o stężeniu 991 ppm, a w przypadku wodoru instalację zasilano wodorem o stężeniu 99,9996%, który do pożądanego dla pomiarów stężenia (do 4%) rozcieńczano również azotem. Stanowisko umożliwiało wykonanie testów przy określonej temperaturze pracy warstwy sensorycznej w zakresie do  $350^\circ\text{C}$  dokładnością  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Sprawdzano odpowiedź modelowej struktury czujnikowej na obecność w atmosferze bardzo małych (na poziomie ppm) i nieco wyższych (na poziomie pojedynczych procentów) ilości dwutlenku azotu i wodoru. Kontrolowano zachowanie się warstwy sensorycznej poddanej oddziaływaniu dwutlenku azotu  $\text{NO}_2$  o stężeniach kolejno 3, 8, 25, 80 i 240 ppm oraz wodoru  $\text{H}_2$  o stężeniach odpowiednio 1500, 4000, 10000, 20000 i 40000 ppm. Po wstępnym przepłukaniu komory pomiarowej azotem pomiary wykonywano początkowo przy wzrastającym cyklicznie poziomie stężenia  $\text{NO}_2$ , po czym, po ponownym przepłukaniu instalacji azotem, do komory wprowadzono wodór o stężeniu wzrastającym w poszczególnych cyklach. Przebieg zmian stężenia  $\text{NO}_2$  i  $\text{H}_2$  w komorze pomiarowej przedstawiono na rysunku 1. Rejestrację odpowiedzi warstwy sensorycznej, pracującej w temperaturze  $250^\circ\text{C}$  i  $300^\circ\text{C}$  (w tym zakresie temperatur obserwowano maksimum czułości na obecność  $\text{NO}_2$  w azocie), wykonano przy użyciu multimetru Agilent.

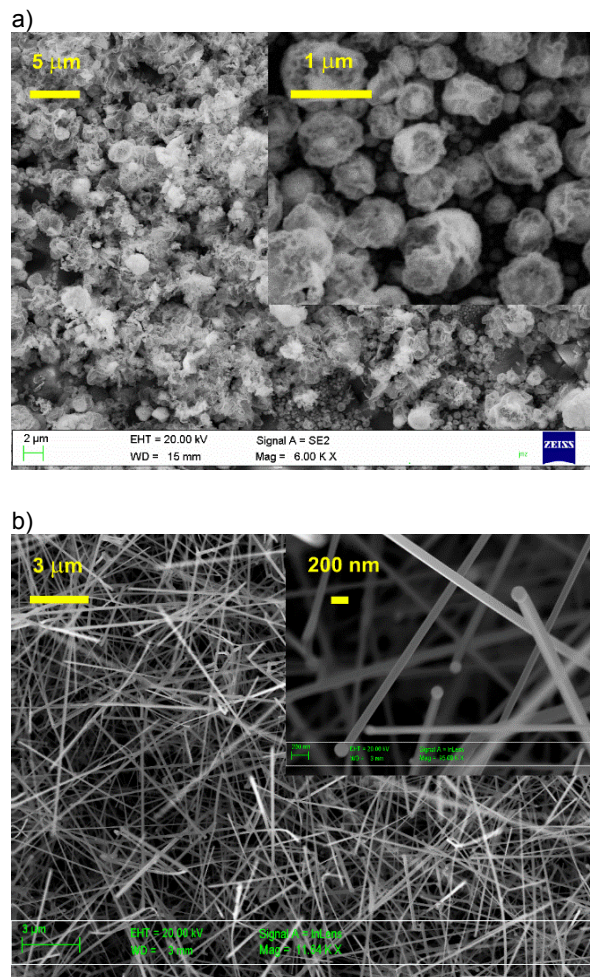


Rys. 1. Przebieg zmian stężenia dwutlenku azotu  $\text{NO}_2$  i wodoru  $\text{H}_2$  w trakcie pomiarów odpowiedzi sensorowej czujników z warstwą  $\text{SnO}_2$

### Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono obraz SEM porowatej powierzchni cienkiej warstwy  $\text{SnO}_2$  uformowanej metodą RGTO oraz przy wykorzystaniu technologii wzrostu nanodrutów  $\text{SnO}_2$ . Analiza obrazów SEM ujawnia charakterystyczną dla technologii RGTO i korzystną z punktu widzenia oddziaływań sensorycznych strukturę powierzchni warstwy  $\text{SnO}_2$ . Na prezentowanym na rysunku 2a zdjęciu wyraźnie widać, że warstwy te mają porowatą strukturę złożoną z aglomeratów o średnicach zmieniających się w zakresie od 40 nm do 1500 nm, między którymi występują dostrzegalne wgłębienia – kanaliki o rozmiarach od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów. Struktury te połączone są ze sobą przez mostki (szyjki) uformowane przypuszczalnie z pojedynczych kryształitów

$\text{SnO}_2$  [1, 15]. Obrazy SEM powierzchni, pokrytej nanodrutami  $\text{SnO}_2$  (rys. 2b), ujawniają charakterystyczną dla tej technologii chaotyczną strukturę złożoną ze splecionych cienkich prętów o długości nieprzekraczającej  $40\ \mu\text{m}$  i o średnicach zmieniających się od 38 nm do 108 nm.

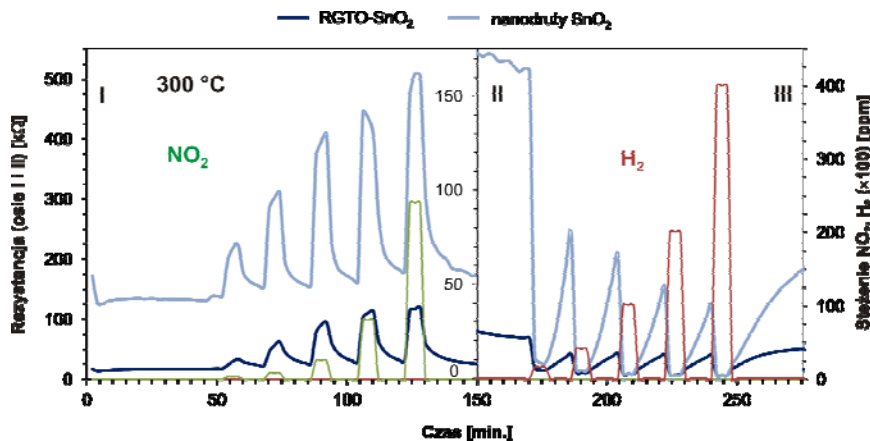


Rys. 2. Obrazy SEM porowatej powierzchni  $\text{SnO}_2$  uformowanej w technologii RGTO (a) i przy wykorzystaniu technologii wzrostu nanodrutów (b)

Na zdjęciu można wyróżnić pojedyncze nanodrutki o średnicach do 190 nm. Ukazana na obrazach SEM topografia warstwy  $\text{SnO}_2$  powinna być potencjalnie korzystna do zastosowań sensorowych. Stosunek powierzchni pojedynczego nanodrutki do jego objętości, jak również porowatość tak uformowanej warstwy, ułatwiająca penetrację gazów w jej głąb, powinny wpływać na wzrost czułości czujników, wykorzystujących tego typu warstwę sensorową.

Pomiary wykonane na stanowisku gazowym umożliwiły prześledzenie zmian rezystancji testowych struktur sensorowych poddanych oddziaływaniu kontrolowanej atmosfery gazowej o zmiennym stężeniu  $\text{NO}_2$  i  $\text{H}_2$ .

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian rezystancji dwóch testowych struktur czujnikowych: z sensoryczną warstwą RGTO- $\text{SnO}_2$  oraz złożoną z nanodrutów  $\text{SnO}_2$ . Jak widać rezystancja obu testowych struktur czujnikowych pracujących w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  wzrasta w wyniku oddziaływania dwutlenku azotu  $\text{NO}_2$ , który jest gazem o właściwościach akceptorowych (gaz utleniający) i maleje w obecności gazu o właściwościach donorowych, jakim jest wodór  $\text{H}_2$  (gaz redukujący).



Rys. 3. Porównanie przebiegu zmian rezystancji (pionowe osie I i II) testowych struktur czujnikowych z sensoryczną warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub> i z warstwą w postaci nanodrutów SnO<sub>2</sub> poddanych oddziaływaniu dwutlenku azotu NO<sub>2</sub> oraz wodoru H<sub>2</sub>

Podobny przebieg obserwowano w trakcie badań warstw sensorycznych w temperaturze 250°C. W każdym przypadku rejestrowano dryf rezystancji początkowej czujnika, za co może być odpowiedzialnych wiele czynników, w tym między innymi deficyt tlenu w otaczającej warstwą sensoryczną atmosferze w trakcie pomiaru (oddziaływanie z wodorem).

Kolejną obserwacją, jaką poczyniono przy analizie zmian rezystancji testowych czujników, jest spadek czasu odpowiedzi sensorów przy wzroście stężenia gazu NO<sub>2</sub> – najlepiej widoczny dla warstwy RGTO – tabela 1; w przypadku warstwy złożonej z nanodrutów SnO<sub>2</sub>, najdłuższy czas odpowiedzi obserwowano dla stężenia gazu równego 3 ppm i 8 ppm, dla wyższych stężeń badanego gazu czasy odpowiedzi były porównywalne. W pracy [5] przedstawiono wyniki badań odpowiedzi sensorów, na bazie cienkich warstw SnO<sub>2</sub> wytworzonych techniką RGTO, na dwutlenek azotu zawarty w syntetycznym powietrzu. Badania prowadzono w zakresie temperatur od 50 do 550°C. Maksimum czułości sensora obserwowano w temperaturze

250°C, dla której czas odpowiedzi wynosił około 1600 s, zaś w temperaturze 300°C ten czas przekraczał 300 s. Z kolei czas odpowiedzi sensora, złożonego z nanodrutów SnO<sub>2</sub>, zmienił się od 200 do 100 s dla stężeń NO<sub>2</sub>, mieszczących się w zakresie od 0,5 do 20 ppm w syntetycznym powietrzu, o wilgotności równej 30% oraz temperaturze pracy równej 300°C [6].

Nie stwierdzono natomiast istotnego wpływu stężenia wodoru w zakresie od 0,4% do 4% w azocie na czasy odpowiedzi, które dla obu badanych struktur wynosiły około 93-96 sekund (tab. 1). Z doniesień literaturowych [7] wynika, że czas odpowiedzi warstw złożonych z nanodrutów SnO<sub>2</sub>, pracujących w zakresie temperatur 200 - 300°C, wynosił 100 s, dla stężenia wodoru równego 1000 ppm. Dłuższy czas odpowiedzi, wynoszący 153 s, rejestrowano w temperaturze 300°C (nanodrut SnO<sub>2</sub>, 265 ppm H<sub>2</sub>) [8]. Dla warstw RGTO-SnO<sub>2</sub> notowano czas odpowiedzi równy około 10 s (temperatura pracy 400°C, 200 ppm H<sub>2</sub> w syntetycznym powietrzu) [1].

Tabela 1. Czas odpowiedzi badanych sensorów poddanych oddziaływaniu kontrolowanej atmosfery gazowej w temperaturze 300°C

Badany gaz: NO <sub>2</sub>			Badany gaz: H <sub>2</sub>		
Stężenie gazu [ppm]	SnO <sub>2</sub> -RGTO	SnO <sub>2</sub> -nanodrut	Stężenie gazu [ppm]	SnO <sub>2</sub> -RGTO	SnO <sub>2</sub> -nanodrut
	Czas odpowiedzi [s]			Czas odpowiedzi [s]	
3	270	156	1500	104	96
8	240	128	4000	96	
25	192	116	10000	96	
80	120	102	20000	93	
240	108	108	40000	93	

Zarejestrowane zmiany wartości rezystancji testowych struktur czujnikowych pozwoliły na wyznaczenie poziomu względnych zmian rezystancji czujników, zdefiniowanych, jako:

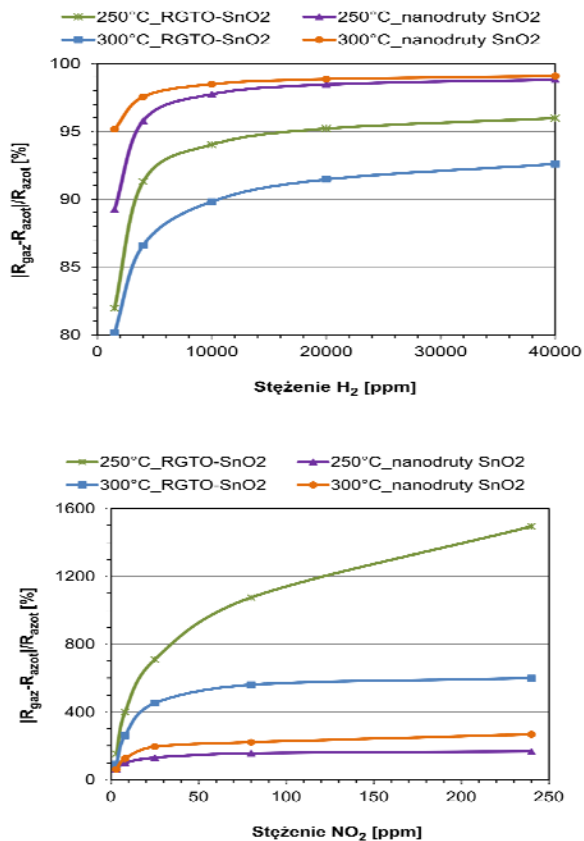
$$(1) \delta = \frac{R_{gaz} - R_{azot}}{R_{azot}} \cdot 100\%$$

Na rysunku 4a przedstawiono względne zmiany rezystancji testowych czujników z sensoryczną warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub> i złożoną z nanodrutów SnO<sub>2</sub> pracującą w temperaturze 250°C i 300°C poddanych działaniu wodoru H<sub>2</sub> o zmiennym stężeniu do 40000 ppm. Z przedstawionych krzywych widać, że względne zmiany rezystancji czujników, wyposażonych w sensoryczną warstwą złożoną z nanodrutów SnO<sub>2</sub>, są na nieco wyższym poziomie, niż ma

to miejsce w przypadku czujników wyposażonych w warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub>. Można zauważyć również, że temperatura pracy warstwy sensorycznej złożonej z nanodrutów SnO<sub>2</sub> ma niewielki wpływ na względne zmiany rezystancji czujnika dla stężeń wodoru powyżej 10000 ppm. Wpływ tego czynnika jest jednak wyraźnie widoczny dla czujnika z sensoryczną warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub>. Wzrost temperatury pracy warstwy z 250°C do 300°C wywołuje spadek względnych zmian rezystancji o około 5%.

Na rysunku 4b przedstawiono względne zmiany rezystancji testowych czujników z sensoryczną warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub> i złożoną z nanodrutów SnO<sub>2</sub>, pracujących w temperaturze 250°C i 300°C; poddanych działaniu dwutlenku azotu NO<sub>2</sub> o zmiennym stężeniu do 240 ppm. Z przedstawionych krzywych widać, że względne zmiany rezystancji czujników wyposażonych w sensoryczną

warstwę (nanodrutu SnO<sub>2</sub>) są na zdecydowanie niższym poziomie niż ma to miejsce w przypadku czujników wyposażonych w warstwę RGTO-SnO<sub>2</sub>. Można zauważyć również, że temperatura pracy warstwy sensorycznej złożonej z nanodrutów SnO<sub>2</sub> ma wyraźny, choć ograniczony wpływ na względne zmiany rezystancji czujnika. Odmienne sytuacja jest w przypadku czujników z sensoryczną warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub>. Wzrost temperatury pracy warstwy z 250°C do 300°C wywołuje drastyczny spadek względnych zmian rezystancji od około 260% do 900%, gdy stężenie NO<sub>2</sub> wynosi odpowiednio 25 ppm oraz 240 ppm.



Rys. 4. Względna zmiana rezystancji w funkcji stężenia badanego gazu (a) H<sub>2</sub> oraz (b) NO<sub>2</sub>, dla warstw SnO<sub>2</sub> wytworzonych dwiema metodami: RGTO i formowania nanodrutów SnO<sub>2</sub>

#### Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań nad oddziaływaniem niewielkich ilości (na poziomie ppm) gazu toksycznego – NO<sub>2</sub> i gazu niebezpiecznego – H<sub>2</sub> o nieco większych stężeniach (na poziomie kilku procent) na sensoryczne warstwy SnO<sub>2</sub> wytwarzane dwiema technikami: RGTO i wzrostu nanodrutów. Rejestrowano zmiany rezystancji klasycznych rezystancyjnych testowych struktur czujnikowych wyposażonych w złote elektrody. W trakcie pomiarów czujniki utrzymywano w temperaturze 250°C i 300°C, co pozwoliło na ocenę wpływu temperatury warstwy sensorycznej na odpowiedź sensora. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Obie technologie: RGTO i termicznego osadzania nanodrutów z fazy gazowej, pozwalają na wytwarzanie cienkich warstw SnO<sub>2</sub> o wyraźnych właściwościach sensorycznych, reagujące na gazy o właściwościach akceptorowych (NO<sub>2</sub>) i donorowych (H<sub>2</sub>).
2. Rejestracja zmian rezystancji testowych struktur czujnikowych ujawniła wyraźne różnice w sposobie

reagowania warstw RGTO-SnO<sub>2</sub> i złożonych z nanodrutów SnO<sub>2</sub>.

3. Stwierdzono znacznie większy wpływ temperatury pracy warstwy sensorycznej RGTO SnO<sub>2</sub> na względne zmiany rezystancji struktury czujnikowej, niż to miało miejsce dla czujników z warstwą złożoną z nanodrutów SnO<sub>2</sub>. Przy czym, jeżeli dla warstwy złożonej z nanodrutów SnO<sub>2</sub> wzrost temperatury z 250°C do 300°C wywoływał dla obu testowanych gazów NO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub> wzrost poziomu względnych zmian rezystancji, to dla warstw RGTO-SnO<sub>2</sub> wzrost temperatury powyżej 250°C powodował dla obu testowanych gazów NO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub> spadek poziomu względnych zmian rezystancji.
4. Dla prawie wszystkich testowanych struktur pracujących w temperaturach 250°C i 300°C stwierdzono wyraźne spowolnienie względnych zmian rezystancji testowych czujników przy wzroście stężenia badanych gazów. Dla wodoru efekt ten był wyraźnie widoczny dla stężeń H<sub>2</sub> przekraczających 10 000 ppm (1%), natomiast dla NO<sub>2</sub> to spowolnienie zmian można było zaobserwować dla stężeń NO<sub>2</sub> powyżej 25 ppm (nanodrutu SnO<sub>2</sub>) oraz powyżej 80 ppm (RGTO-SnO<sub>2</sub>). Wyraźnie odmiennie zachowuje się tu jedynie czujnik z sensoryczną warstwą RGTO-SnO<sub>2</sub> pracujący w temperaturze 250°C i wystawiony na oddziaływanie niewielkich ilości dwutlenku azotu.

Uzyskane wyniki będą podstawą dalszych prac nad technikami wytwarzania sensorycznych warstw SnO<sub>2</sub> oraz optymalizacją konstrukcji testowych czujników rezystancyjnych.

Prace wykonano w ramach Badań Statutowych - BK odpowiednich Instytutów.

#### LITERATURA

- [1] Sberveglieri G., Faglia G., Groppeli S., Nelli P., Camanzi A., A new technique for growing large surface area SnO<sub>2</sub> thin film (RGTO-technique), *Semiconductor Science Technology*, vol. 5, 1231-1233, 1990
- [2] Dieguez A., Romano-Rodriguez A., Morante J.R., Sangaletti L., Depero L.E., Comini E., Faglia G., Sberveglieri G., Influence of the completion of oxidation on the long-term response of RGTO SnO<sub>2</sub> gas sensors, *Sensors and Actuators B*, vol. 66, 40-42, 2000
- [3] Teterycz H., Grubowarstwowe chemiczne czujniki gazów na bazie dwutlenku cyny, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005
- [4] Miller T.A., Bakrania S.D., Perez C., Wooldrige M.S., Nanostructured tin dioxide materials for gas sensor applications, [in:] Geckeler K., Rosenberg E. (eds.): *Functional nanomaterials*. Michigan, USA, American Scientific Publishers, 1-24, 2006
- [5] Ruhland B., Becker Th., Mueller G., Gas kinetics interaction of nitrous oxides with SnO<sub>2</sub> surfaces, *Sensors and Actuators B*, vol. 50, 85-94, 1998
- [6] Hwang I.S., Choi Y.J., Park J.H., Park J.G., Kim K.W., Lee J.H., Synthesis of SnO<sub>2</sub> nanowires and their gas sensing characteristics, *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 49, 1229-1233
- [7] Wang B., Zhu L.F., Yang Y.H., Xu N.S., Yang G.W., *Fabrication of a SnO<sub>2</sub> nanowire gas sensor and sensor performance for hydrogen*, *J. Phys. Chem.*, vol. 112, 6643-6647
- [8] Brunet E., Maier T., Mutinati G.C., Steinhauer S., Köcka A., Gspanb C., Grogger W., Comparison of the gas sensing performance of SnO<sub>2</sub> thin film and SnO<sub>2</sub> nanowire sensors, *Sensors and Actuators B*, vol. 165, 110-118, 2012
- [9] Uljanow J., Waczyński K., Broja A., Karczevska-Buczek T., Microscopic study of the structure of the SnO<sub>2</sub> thin films obtained by the RGTO technique, *Optoelectronic and Electronic Sensors IV*, Proceedings of SPIE, vol. 4516, 26-31, 2001
- [10] Uljanow J., Waczyński K., Izydorczyk W., Jasiok D., Studies of

- the island structure of SnO<sub>2</sub> thin films grown with the RGTO technique, *Proceedings of XXIX International Conference IMAPS Poland Chapter*, Dąbówko, 171-174, 2005
- [11] Szuber J., Uljanow J., Karczewska-Buczek T., Jakubik W., Waczyński K., Kwoka M., Kończak S., On the correlation between morphology and gas sensing properties of RGTO SnO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films*, vol. 490, 54-58, 2005
- [12] Uljanow J., Waczyński K., Study of the Structure of the SnO<sub>2</sub> Thin Films Obtained by the RGTO Technique, *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 6, 676-679, 2005
- [13] Wang S., Cheng G., Cheng K., Jiang X., Du Z., The current image of single SnO<sub>2</sub> nanobelt nanodevice studied by conductive atomic force microscopy, *Nanoscale Res Lett*, vol. 6, 541-546, 2011
- [14] Izydorczyk W., Izydorczyk J., Mazurkiewicz J., Magnuski M., Uljanow J., Electrical characterization of 1D SnO<sub>2</sub> nanowires, *Nanotechnology (IEEE-NANO)*, 2012 12th IEEE Conference on, 1-6, 2012, Digital Object Identifier: 10.1109/NANO.2012.6322207
- [15] Waczyński K., Cienkie warstwy dwutlenku cyny w aspekcie zastosowań w mikroelektronice, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013

---

**Autorzy:** dr inż. Krzysztof Waczyński, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: [kwaczynski@polsl.pl](mailto:kwaczynski@polsl.pl); dr inż. Weronika Izydorczyk, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: [veronika.izydorczyk@polsl.pl](mailto:veronika.izydorczyk@polsl.pl); mgr inż. Natalia Niemiec, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice; dr inż. Jerzy Uljanow, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice; dr inż. Wiesław Domański, Politechnika Śląska, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice; dr inż. Janusz Mazurkiewicz, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice.