

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH
WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ELEKTRONIKI I INFORMATYKI**

**Autoreferat
pracy doktorskiej**

Michał Sitarz

*Comparative analysis of the surface properties
of tin dioxide SnO₂ one-dimensional
and two-dimensional nanostructures*

*(Analiza porównawcza właściwości powierzchniowych
jednowymiarowych i dwuwymiarowych
nanostruktur dwutlenku cyny SnO₂)*

**Promotor:
Prof. dr hab. inż. Jacek Szuber**

**Promotor pomocniczy:
Dr inż. Monika Kwoka**

Gliwice 2014

SPIS TREŚCI

1. Motywacja podjęcia tematu	- 3 -
2. Cel i zakres pracy	- 4 -
3. Wyniki badań i dyskusja.....	- 6 -
3.1. Analiza porównawcza nanodrutów PVD SnO ₂	- 6 -
3.2. Analiza porównawcza nanodrutów PVD SnO ₂ i nanowarstw L-CVD SnO ₂	- 10 -
4. Wnioski końcowe i podsumowanie.....	- 12 -
Literatura.....	- 14 -
Wykaz publikacji z listy ministerialnej	- 15 -

Praca doktorska była realizowana w ramach:

- *Programu Erasmus na Uniwersytecie w Bresci (Włochy),*
- *Funduszu Badań Kierunkowych Instytutu Elektroniki Politechniki Śląskiej, oraz częściowo finansowana w ramach Projektu rozwojowego InTechFun realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007 - 2013.*

Autor rozprawy był stypendystą w Projekcie „SWIFT (Stypendia Wspomagające Innowacyjne Forum Technologii - POKL.08.02.01-24-005/10)” oraz w Projekcie „DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska”, współfinansowanych ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

1. Motywacja podjęcia tematu

Dwutlenek cyny (SnO_2) jest jednym z najbardziej popularnych tlenków półprzewodnikowych i cieszy się dużym zainteresowaniem naukowym, ze względu na jego potencjalne zastosowania w rezystancyjnych sensorach gazów toksycznych, cienkich elektrodach przewodzących i ogniwach słonecznych. Wynika to z jego wysokiego przewodnictwa elektrycznego ($\sim 10^2 \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), wysokiej przezroczystości (70-80%) w okolicach obszaru widzialnego i podczerwieni promieniowania świetlnego, szerokiej przerwy energetycznej (3.6 eV) i bardzo aktywnej chemicznie powierzchni w obecności gazów utleniających i redukujących [1-3].

Właściwości SnO_2 są ściśle związane z ich morfologią oraz właściwościami chemicznymi, w tym stechiometrią, ilością domieszek bądź zanieczyszczeń. Ze względu na słabe charakterystyki sensorowe dotychczas stosowanych grubych i cienkich warstw SnO_2 [4-6], aktualne badania naukowe są skupione na nanomateriałach, takich jak nanodruły, nanorurki, nanowstążki, itd. [7-8]. Materiały te cechuje duży stosunek objętości do powierzchni, dobra stabilność chemiczna [9-10] i właściwości elektryczne [11]. Nanodruły najprawdopodobniej wykazują najbardziej interesującą morfologię w aspekcie zastosowań sensorowych, ze względu na to, iż około 30% atomów jest zlokalizowanych na powierzchni, gdzie zachodzi zjawisko mechanizmu sensorowego [12-13] i w ten sposób zwiększają czułość sensora.

Bardzo niepożądanym efektem wpływającym na działanie sensora jest niekontrolowana adsorpcja zanieczyszczeń na powierzchni [14], w kontakcie z atmosferą, która jest naturalnym środowiskiem dla pracy sensora. Jednakże nanodruły prezentują troszkę inne właściwości w stosunku do innych polikrystalicznych nanostruktur, co sprawia, że istotne jest zbadanie ich powierzchni oraz oddziaływań powierzchnia-powietrze w celu ich zastosowań w sensorach gazowych.

Powyżej opisane zjawiska wynikają z różnorodnej stechiometrii oraz ilości zanieczyszczeń węglowych na powierzchni jedno- i dwuwymiarowych nanostruktur SnO_2 . W związku z tym wysunięto tezę pracy, że zróżnicowana ilość zanieczyszczeń węglowych na powierzchni różnych nanostruktur SnO_2 może być ściśle związana z ich odmienną strukturą krystalograficzną i morfologią, co może mieć wpływ na charakterystyki sensorowe.

W ramach pracy doktorskiej w kolejnych rozdziałach opisano:

- szczegółowy przegląd literaturowy dotyczący właściwości dwutlenku cyny – struktur krystalicznych, nanodrutów i nanowarstw SnO₂; oraz najnowszych technologicznych metod wytwarzania różnorodnych form nanostruktur SnO₂ (rozdział 2);
- cel i zakres rozprawy (rozdział 3);
- opis metod badawczych użytych w badaniach naukowych (rozdział 4);
- opis procedur oraz technik eksperymentalnych (rozdział 5);
- osiągnięte wyniki badań własnych oraz ich analiza (rozdziały 6 i 7);
- podsumowanie i uwagi końcowe (rozdział 8).

2. Cel i zakres pracy

W celu weryfikacji tezy, podjęto próbę określenia właściwości powierzchni nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, Au bądź Pt, które zostały wytworzone w Sensor Laboratory na Wydziale Inżynierii Uniwersytetu w Bresci (Włochy), a następnie porównania ich do nanowarstw L-CVD SnO₂ pokrytych monowarstwą Ag, które są od wielu lat obiektem badań w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

W ramach przeprowadzonych badań określono:

- morfologię powierzchni nanodrutów PVD SnO₂ metodą Skaningowej Mikroskopii Elektronowej (SEM),
- własności chemiczne (stechiometria i czystość) metodą Rentgenowskiej Spektroskopii Fotoelektronowej (XPS),
- zachowanie się gazów resztkowych na powierzchni badanych struktur metodą Spektroskopii Desorpcji Termicznej (TDS).

Następnie, bazując na otrzymanych wynikach porównano właściwości nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) oraz nanowarstw L-CVD SnO₂ w aspekcie ich zastosowań sensorowych.

3. Wyniki badań i dyskusja

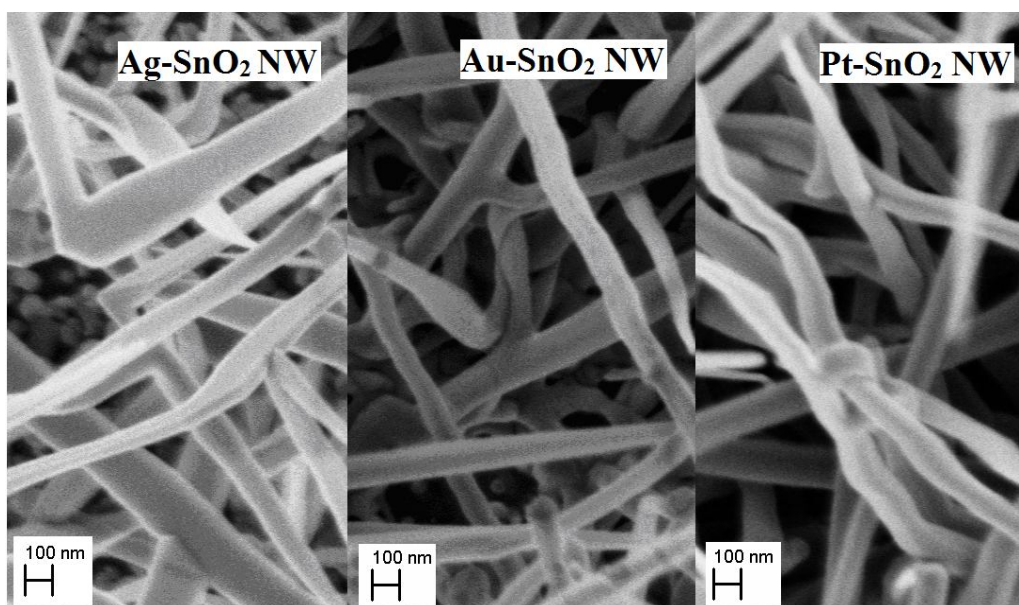
Zgodnie z celem badań, w pracy doktorskiej przeprowadzono:

- analizę porównawczą morfologii i właściwości chemicznych nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, Au lub Pt,
- analizę porównawczą właściwości nanodrutów PVD SnO₂ w odniesieniu do nanowarstw L-CVD Ag-SnO₂.

Aparaturę badawczą i morfologię badań opisano w rozdziale 5 pracy doktorskiej.

3.1. Analiza porównawcza nanodrutów PVD SnO₂

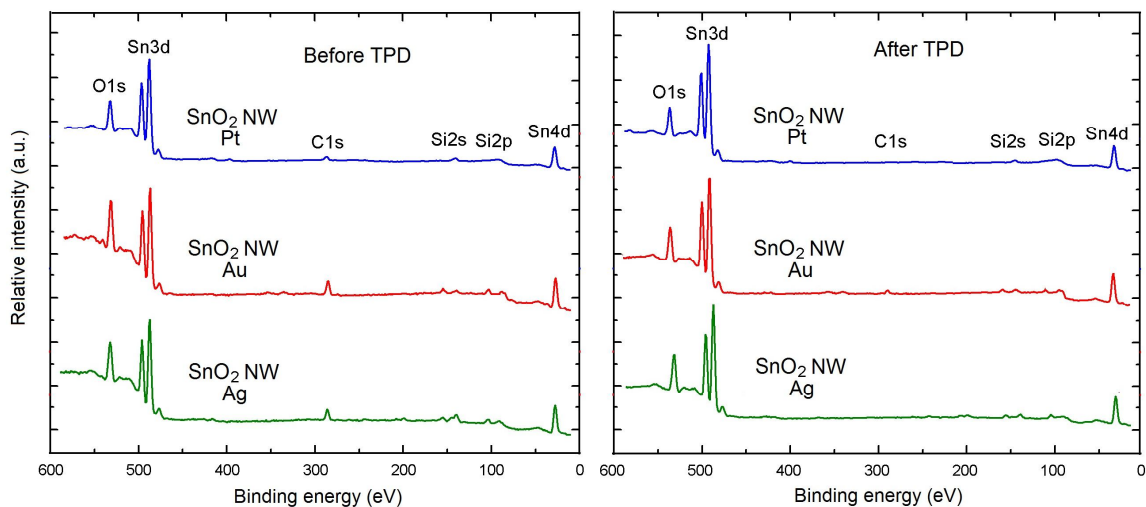
Rys.3.1. przedstawia obrazy SEM nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100).



Rys.3.1. Obrazy SEM nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym różnymi metalami (Ag, Au i Pt) (odpowiada Fig.6.24. w pracy doktorskiej).

Jak widać nanodrutu SnO₂ otrzymane metodą PVD na podłożu Si(100) pokrytym różnymi metalami mają zbliżony przekrój poprzeczny w zakresie 100-150 nm, oraz podobny rozkład i gęstość upakowania na podłożu krzemowym Si(100). Jednakże nanodrutu SnO₂ osadzone na podłożu Si(100) pokrytym Pt są nieco dłuższe i cieńsze. Dodatkowo zaobserwowano, że na powierzchni nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu pokrytym Au znajdują się drobne „kuleczki” Au. Natomiast pod nanodrutami SnO₂ osadzonymi na podłożu Si(100) pokrytym Ag można zauważyć izolowane ziarna, najprawdopodobniej SnO₂. Na podstawie powyższych obserwacji można wywnioskować, że morfologia nanodrutów PVD SnO₂ silnie zależy od rodzaju metalu na podłożu Si(100) i ma ona wpływ na ich właściwości chemiczne, co potwierdziły badania XPS i TDS, opisane poniżej.

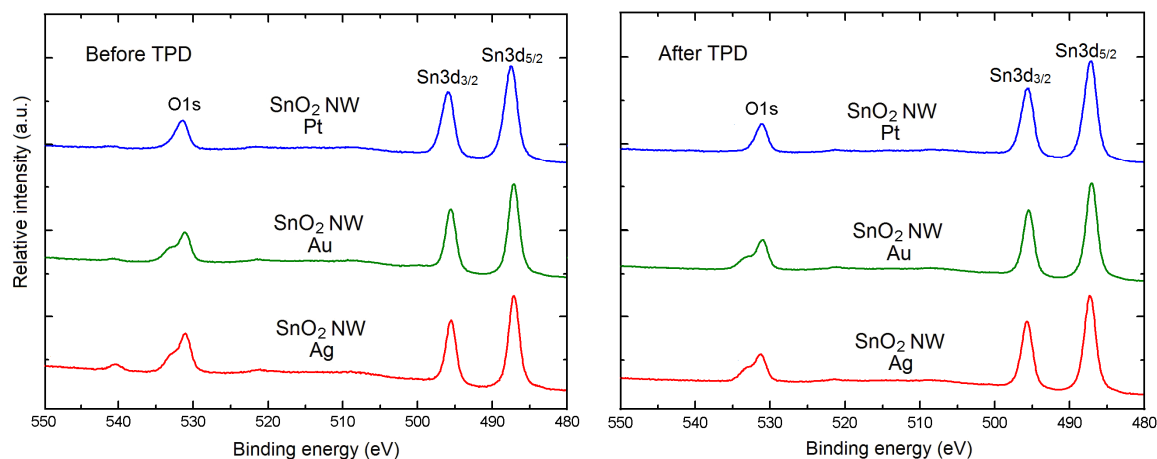
Rys.3.2. przedstawia widma przeglądowe XPS nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, Au i Pt przed i po procesie TPD (TDS).



Rys.3.2. Porównawcze widmo przeglądowe XPS nanodrutów SnO₂ osadzonych na krzemie pokrytym Ag, Au i Pt przed i po procesie TPD (odpowiada Fig.6.25. w pracy doktorskiej).

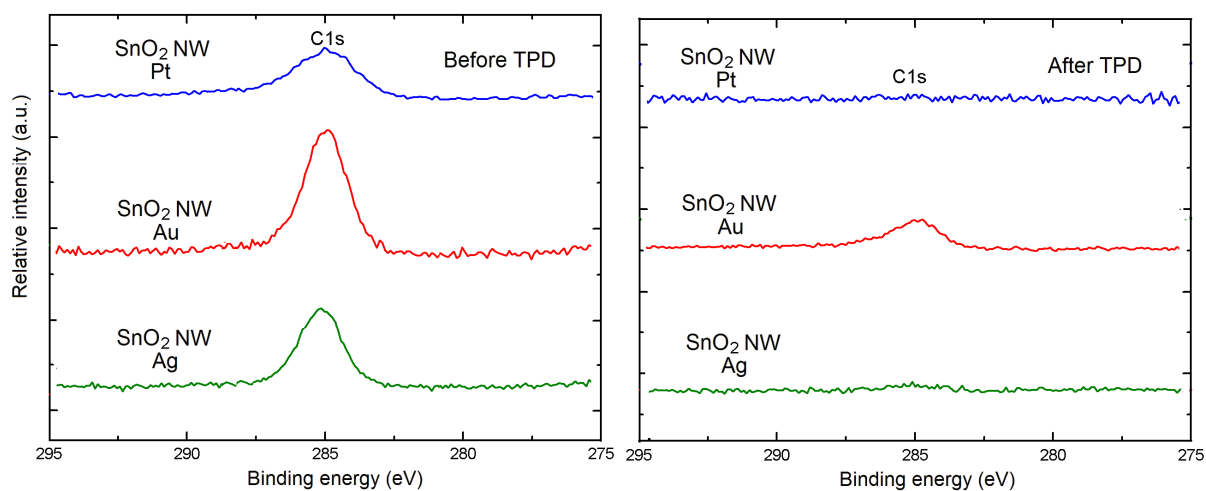
Składają się one z linii XPS o określonej energii wiązania, takich jak O1s, Sn3d, C1s, Sn4d i Si2p. Łatwo zauważyć, że najważniejsza różnica w widmach przed i po procesie TPD sprowadza się do wyraźnego zmniejszenia się intensywności linii XPS C1s, co świadczy o redukcji zanieczyszczeń węglowych. Bardziej dokładna analiza zachowywania się linii XPS C1s zostanie przedstawiona poniżej.

Rys.3.3. przedstawia z kolei okno widmowe O1s i Sn3d XPS nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si pokrytym Ag, Au i Pt przed i po procesie TPD. Wykorzystując intensywności linii widmowych O1s i Sn3d_{5/2} oraz uwzględniając współczynniki czułości pierwiastkowej ASF [21], wyznaczono względną koncentrację [O]/[Sn] wszystkich badanych obiektów, co zebrano w Tabeli 3.1.



Rys.3.3. Okno widmowe XPS O1s i Sn3d nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si pokrytym Ag, Au i Pt przed i po procesie TPD (odpowiada Fig.6.26. w pracy doktorskiej).

Z kolei Rys.3.4. przedstawia linie XPS C1s, co umożliwia obserwację węglowych zanieczyszczeń powierzchniowych. Korzystając z intensywności linii C1s oraz Sn3d_{5/2}, na bazie wcześniej wspomnianej procedury wyznaczono koncentrację [C]/[Sn], co również zestawiono w Tabeli 3.1.



Rys.3.4. Linie XPS C1s nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, Au i Pt przed i po procesie TPD (odpowiada Fig.6.27. w pracy doktorskiej).

Tabela 3.1. (odpowiada Table 6.7. w pracy doktorskiej)

Względna koncentracja głównych pierwiastków znajdujących się na powierzchni nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, Au i Pt przed i po procesie TPD.

Użyty metal	Status próbki	Względna koncentracja	
		[O/Sn]	[C/Sn]
Ag	Przed TPD	1.87 ± 0.05	1.28 ± 0.05
	Po TPD	2.01 ± 0.05	0.00 ± 0.05
Au	Przed TPD	2.26 ± 0.05	1.86 ± 0.05
	Po TPD	1.84 ± 0.05	0.54 ± 0.05
Pt	Przed TPD	1.85 ± 0.05	0.82 ± 0.05
	Po TPD	1.89 ± 0.05	0.00 ± 0.05

Dodatkowa analiza widm XPS nanodrutów PVD SnO₂ wykazała, że na powierzchni nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag i Pt brak jest metalu katalitycznego, w przeciwieństwie do nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na Si(100) pokrytym Au, dla których stwierdzono obecność Au o stałej względnej koncentracji [Au]/[Sn] ~0.11.

Wyniki badań nanodrutów SnO₂ metodą XPS były w dobrej zgodności z wynikami badań TDS, które zestawiono w Tabeli 3.2.

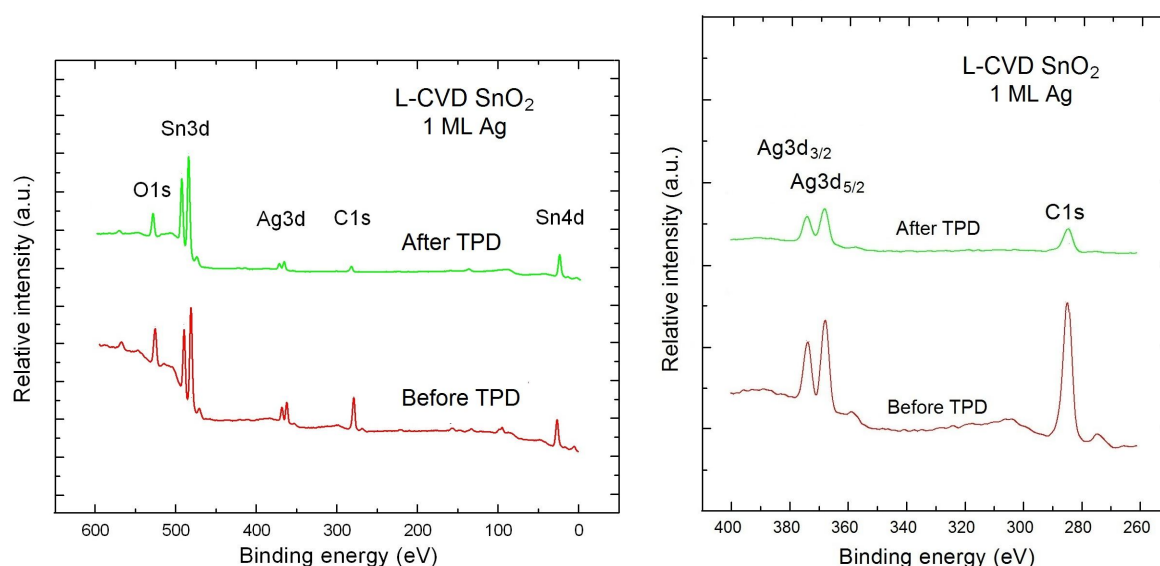
Tabela 3.2. (odpowiada Table 6.8. w pracy doktorskiej)
Maksymalne ciśnienia parcjale wybranych gazów desorbowanych z powierzchni nanodrutów PVD SnO₂ w procesie TPD, oraz odpowiadająca im temperatura.

Próbka	Maksymalne ciśnienia parcjale wybranych gazów oraz odpowiadająca im temperatura			
	O ₂	H ₂	H ₂ O	CO ₂
Nanodrutu SnO ₂ osadzone na Si(100) pokrytym Ag	10 ⁻⁹ mbar (170 °C)	10 ⁻⁶ mbar (260 °C)	10 ⁻⁸ mbar (170 °C)	10 ⁻⁹ mbar (200 °C)
Nanodrutu SnO ₂ osadzone na Si(100) pokrytym Au	10 ⁻⁸ mbar (240 °C)	10 ⁻⁶ mbar (250 °C)	10 ⁻⁶ mbar (260 °C)	10 ⁻⁶ mbar (290 °C)
Nanodrutu SnO ₂ osadzone na Si(100) pokrytym Pt	10 ⁻⁸ mbar (160-240 °C)	10 ⁻⁶ mbar (240 °C)	10 ⁻⁷ mbar (240 °C)	10 ⁻⁷ mbar 120-250 °C

Na podstawie informacji zebranych w Tabeli 3.1. i Tabeli 3.2. można stwierdzić, że dla nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag oraz Pt, względna koncentracja [O]/[Sn] wzrosła po procesie TPD, co świadczy o tym, że proces ten poprawia ich stechiometrię. Jest to prawdopodobnie wynikiem usunięcia zanieczyszczeń węglowych. Nieco inny efekt zaobserwowano dla nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na Si(100) pokrytym Au, w przypadku których względna koncentracja [O]/[Sn] po procesie TPD istotnie zmalała, co może mieć związek z tym, że względna koncentracja [C]/[Sn] zmniejszyła się tylko do wartości 0.58. Świadczy to o tym, że zanieczyszczenie węglowe, które pozostały na nanodrutach PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Au, uniemożliwiają uzyskanie ich pełnej stechiometrii.

3.2. Analiza porównawcza nanodrutów PVD SnO₂ i nanowarstw L-CVD SnO₂

Zgodnie z celem i zakresem pracy, właściwości powierzchniowe nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag porównano z właściwościami powierzchniowymi nanowarstw L-CVD osadzonych na Si(100) pokrytych monowarstwą Ag.



Rys.3.5. Widmo przeglądowe XPS (lewy rysunek) oraz okno widmowe XPS Ag3d-C1s (prawy rysunek) nanowarstw L-CVD Ag-SnO₂ osadzonych na Si przed i po procesie TPD (odpowiadają Fig.7.1.i Fig.7.2. w pracy doktorskiej)

Rys.3.5. (lewa strona) przedstawia widma przeglądowe nanowarstw L-CVD Ag-SnO₂ przed i po procesie TPD. Zawierają one dobrze rozpoznawalne linie XPS O1s, Sn3d, C1s, Sn4d, Si2s i Si2p. Podobnie jak dla nanodrutów PVD SnO₂, ich właściwości chemiczne istotnie się zmieniły po procesie TPD. Intensywność linii C1s jest znacznie mniejsza, co oznacza, że podczas procesu TPD, niepożądane zanieczyszczenia węglowe zostały częściowo usunięte. Należy również zwrócić uwagę na zmniejszenie się piku Ag3d po procesie TPD (Rys.3.5 – prawa strona), co jest związane z dyfuzją Ag w głąb nanowarstwy pod wpływem temperatury. Zostało to potwierdzone badaniami XPS połączonymi z profilowaniem jonowym [21,22].

Za pomocą procedury opisanej w poprzednim podrozdziale ponownie wyznaczono względne koncentracje najważniejszych składników i porównano je z wynikami dla nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, co zestawiono w Tabeli 3.3.

Tabela 3.3. (na podstawie Table 7.2. w pracy doktorskiej)

Względna koncentracja głównych pierwiastków na powierzchni nanowarstw L-CVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym monowarstwą Ag, oraz nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag - przed i po procesie TPD.

Próbka	Status próbki	Względna koncentracja	
		[O/Sn]	[C/Sn]
Nanowarstwy L-CVD Ag-SnO ₂	Przed TPD	1.55 ± 0.05	4.00 ± 0.05
	Po TPD	1.30 ± 0.05	0.80 ± 0.05
Nanodrutu SnO ₂ osadzone na Si(100) pokrytym Ag	Przed TPD	1.87 ± 0.05	1.28 ± 0.05
	Po TPD	2.01 ± 0.05	0.00 ± 0.05

Wyniki badań XPS są w dobrej zgodności z wynikami badań TDS, o czym świadczy zestawienie w Tabeli 3.4.

Tabela 3.4. (odpowiada Table 7.3. w pracy doktorskiej)

Maksymalne ciśnienia parcjalne wybranych gazów desorbowanych z powierzchni nanowarstw L-CVD Ag-SnO₂ i nanodrutów PVD SnO₂ podczas procesu TPD, oraz odpowiadająca im temperatura.

Próbka	Maksymalne ciśnienia parcjalne wybranych gazów oraz odpowiadająca im temperatura			
	O ₂	H ₂	H ₂ O	CO ₂
Nanowarstwy L-CVD SnO ₂ osadzone na Si(100) pokryte 1 monowarstwą Ag	10 ⁻⁸ mbar (170 °C)	10 ⁻⁶ mbar (180 °C)	10 ⁻⁷ mbar (160 °C)	10 ⁻⁷ mbar (150÷250°C)
Nanodrutu SnO ₂ osadzone na Si(100) pokrytym Ag	10 ⁻⁹ mbar (170 °C)	10 ⁻⁶ mbar (260 °C)	10 ⁻⁸ mbar (170 °C)	10 ⁻⁹ mbar (200 °C)

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski dotyczące podobieństw i różnic pomiędzy nanodrutami PVD SnO₂ osadzonymi na podłożu Si(100) pokrytym Ag, a nanowarstwami L-CVD Ag-SnO₂:

- W wyniku procesu TPD, względna koncentracja [O]/[Sn] nanowarstw L-CVD SnO₂ zmniejszyła się z 1.55 do 1.30, w przeciwieństwie do nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, dla których stosunek ten zwiększył się do wartości odpowiadającej pełnej stechiometrii.
- Po procesie TPD, dla nanowarstw L-CVD SnO₂ zauważono tylko częściowy zanik zanieczyszczeń węglowych. W przeciwieństwie do nanodrutów SnO₂ osadzonych na Si(100) pokrytym Ag, dla których zaobserwowano zanik zanieczyszczeń węglowych.
- Badania metodą TPD wykazały, że tlen (O₂), para wodna (H₂O), wodór (H₂) oraz dwutlenek węgla (CO₂) desorbują pod wyższym ciśnieniem z warstw L-CVD SnO₂ niż z powierzchni nanodrutów.

4. Wnioski końcowe i podsumowanie

Celem rozprawy doktorskiej była analiza porównawcza właściwości powierzchniowych nanodrutów SnO₂ osadzonych na Si(100) pokrytym metalami szlachetnymi (Ag, Au, Pt) w odniesieniu do nanowarstw L-CVD SnO₂ pokrytych monowarstwą Ag, ze szczególnym uwzględnieniem morfologii i chemii powierzchni, na podstawie badań metodami SEM, XPS i TDS.

Na podstawie przeprowadzonych badań i wykonanych analiz wyciągnięto następujące wnioski:

- Wszystkie nanodruły PVD SnO₂ osadzone na podłożu Si(100) pokrytym metalami Ag, Au i Pt mają podobne uporządkowanie, z tym że średni przekrój nanodrutów SnO₂ na podłożu Si(100) pokrytym Ag i Au jest w zakresie 150÷200 nm, natomiast nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Pt mieści jest w zakresie 100÷150 nm, przy czym są one nieco dłuższe.
- Pod nanodrutami PVD SnO₂ osadzonymi na Si(100) pokrytym Ag stwierdzono izolowane ziarna, podczas gdy na powierzchni nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na Si(100) pokrytym Au można zauważyć „kuleczki” z Au.
- Nanowarstwy L-CVD SnO₂ osadzone na Si(100) i pokryte monowarstwą Ag składają się głównie z dużej ilości izolowanych ziaren, o średnicy w przedziale 20÷50 nm, których struktura krystaliczna została potwierdzona metodą XRD [18,19].
- Po procesie TPD, w przypadku nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag, względna koncentracja [O]/[Sn] wzrosła z 1.87 do pełnej stechiometrii SnO₂, co powiązano z faktem redukcji zanieczyszczeń węglowych podczas procesu TPD [20]. Podobne zjawisko zaobserwowano dla nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Pt, ale nie udało się osiągnąć ich pełnej stechiometrii. Całkowicie odwrotne zjawisko zaobserwowano dla nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Au, dla których zaobserwowano zmniejszenie się względnej koncentracji [O]/[Sn] z 2.16 do 1.84.
- Dla nanowarstw L-CVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytych monowarstwą Ag, w wyniku procesu TPD względna koncentracja [O]/[Sn] zmniejszyła się z 1.55 do wartości takiej samej jak dla świeżo osadzonych nanowarstw w warunkach UHV [14].

- Dla nanodrutów PVD SnO₂ osadzonych na Si(100) pokrytym Ag i Pt zaobserwowano całkowity zanik zanieczyszczeń węglowych C w wyniku procesu TPD – największa desorpcja CO₂ została zaobserwowana w temperaturze około 200 °C. Natomiast nanodrutu SnO₂ osadzone na podłożu Si(100) pokrytym Au wykazują największą ilość zanieczyszczeń węglowych, o czym świadczy względna koncentracja [C]/[Sn]=1.86, przy czym w wyniku procesu TPD tylko ok. 70% tych zanieczyszczeń zostało usuniętych.
- Dla nanowarstw L-CVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) i pokrytych monowarstwą Ag przed procesem TPD zaobserwowano bardzo wysoki poziom zanieczyszczeń węglowych (o względnej koncentracji [C]/[Sn] = 4.0). Stosunek ten obniżył się pięciokrotnie w wyniku procesu TPD, co jest powiązane z największą desorpcją CO₂ w zakresie temperatur 150-250 °C.
- Dla nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Ag i Pt nie zaobserwowano obecności metalu na ich powierzchni, w przeciwieństwie do nanodrutów SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytym Au, na których zaobserwowano „kuleczki” Au.
- Dla nanowarstw L-CVD SnO₂ osadzonych na podłożu Si(100) pokrytych monowarstwą Ag zaobserwowano tylko niewielką ilość metalu na ich powierzchni, co wynikało z obecności niepożądanych powierzchniowych zanieczyszczeń, przy czym po procesie TPD względna koncentracja [Ag]/[Sn] zmalała 3-krotnie, co było związane z dyfuzją Ag w głąb nanowarstw L-CVD SnO₂, co stwierdzono na podstawie badań XPS z profilowaniem jonowym [21,22].

Otrzymane w pracy wyniki potwierdziły zatem główną tezę pracy, że odmienna ilość zanieczyszczeń węglowych na powierzchni badanych nanostruktur SnO₂ wynika z ich różnorodnej morfologii, co może być przyczyną różnic w charakterystykach sensorowych.

Wszystkie uzyskane informacje mogą być bardzo użyteczne w dalszej optymalizacji technologii nanostruktur SnO₂ w aspekcie zastosowań sensorowych.

Literatura

- [1] N.Barsan, M. Schweitzer-Barberich, W. Göpel, *Fresenius J. Anal. Chemistry* 365 (1999) 287.
- [2] E. Comini, G. Faglia, G. Sberveglieri: (Eds.), *Electrical based gas sensors, in Solid State Gas Sensing*, Springer; New York, 2009, 47.
- [3] R. Chandrasekhar, K.L. Choy, *J. Cryst. Growth* 231 (2001) 215.
- [4] W. Göpel, K.D. Schierbaum, *Sensors and Actuators B26-27* (1995) 1.
- [5] G. Eranna, *Metal oxide nanostructures as gas sensing devices*, CRC Press, Boca Raton, 2012.
- [6] M.A. Carpenter, S. Mathur, A. Kolmakov, *Metal oxide nanomaterials for chemical sensors*, Springer, New York, 2013.
- [7] V.N.T. Satyanarayana, K. Kuchibhatla, A.S. Karakoti, D. Bera, S. Seal, *Progr. Mater. Sci.* 52 (2007) 699.
- [8] A. Kolmakov, M. Moskovits, *Ann. Rev. Mater. Res.* 34 (2004) 151.
- [9] S. Law, H. Kind, F. Kim, B. Messer, P. Yang P, *Angew. Chemie Int. Edit.* 41 (2002) 2405.
- [10] Z.L. Wang, *Adv. Mater.* 12 (2000) 1295.
- [11] E. Comini, C. Baratto, G. Faglia, M. Ferroni, A. Vomiero, G. Sberveglieri, *Progr. Mater. Sci.* 54 (2009) 1-67.
- [12] M. Franke, T. Koplín, U. Simon, *Small* (2006) 236.
- [13] B. Wang, L.F. Zhu, J.H. Yang, N.S. Xu, G.W. Yang, *J. Phys. Chem. C* 112 (2008) 6643.
- [14] M. Kwoka, L. Ottaviano, M. Passacantando, S. Santucci, G. Czempik, J. Szuber, *Thin Solid Films*, 490 (2005) 36.
- [15] <http://sensor.ing.unibs.it/>
- [16] E. Comini, G. Faglia, M. Ferroni, A. Ponzoni, A. Vomiero, G. Sberveglieri, *J. Mol. Catal: A - Chemical* 305 (2009) 170.
- [17] M. Kwoka, N. Waczynska, P. Kościelniak, M. Sitarz, J. Szuber, *Thin Solid Films* 520 (2011) 913.
- [18] R. Larciprete, E. Borsella, P. De Padova, M. Mangiantini, P. Perfetti, *J. Vac. Sci. Technol.* A11(1993)59.
- [19] R. Larciprete, E. Borsella, P. De Padova, P. Perfetti, G. Faglia, G. Sberveglieri, *Thin Solid Films* 323 (1998) 291.
- [20] M. Sitarz, M. Kwoka, E. Comini, D. Zappa, J. Szuber, *Nanoscale Research Letters* 9 (2014) 43.
- [21] M. Kwoka, L. Ottaviano, M. Passacantando, S. Santucci, J. Szuber, *Applied Surface Science* 252 (2006) 7730.
- [22] M. Kwoka, L. Ottaviano, M. Passacantando, S. Santucci, G. Czempik, J. Szuber, *Applied Surface Science* 254 (2008) 8089.

Wykaz publikacji z listy ministerialnej

- Publikacje stanowiące podstawę rozprawy:
 - I. **M.Sitarz**, M.Kwoka, E.Comini, D.Zappa, J.Szuber
Surface chemistry of SnO₂ nanowires on Ag-catalyst-covered Si substrate studied using XPS and TDS methods
Nanoscale Research Letters 9 (2014) 43
Liczba punktów wg. Listy A MNiSW: 35
 - II. M.Kwoka, N.Waczynska, P.Kościelniak, **M.Sitarz**, J.Szuber
X-ray photoelectron spectroscopy and thermal desorption spectroscopy comparative studies of L-CVD SnO₂ ultra thin films
Thin Solid Films 520 (2011) 913
Liczba punktów wg. Listy A MNiSW: 30

- Pozostałe publikacje:
 - I. A.Blachy, P.Kościelniak, **M.Sitarz**, J.Szuber, J.Żak
Pedot brushes electrochemically synthesized on thienyl-modified glassy carbon surfaces,
Electrochimica Acta 62 (2012) 441
Liczba punktów wg. Listy A MNiSW: 35
 - II. P.Kościelniak, **M.Sitarz**, E.Maciak, J.Szuber
The effect of Si substrate preparation on surface morphology and surface composition of In₂O₃ ultrathin films deposited by reotaxial growth and vacuum oxidation
Applied Surface Science 258 (2012) 8419
Liczba punktów wg. Listy A MNiSW: 30
 - III. J.Szuber, M.Kwoka, P.Kościelniak, **M.Sitarz**
Optymalizacja technologii reotaksjalnego osadzania nanowarstw wybranych przezroczystych tlenków przewodzących
Elektronika 52 (2011) 25
Liczba punktów wg. Listy B MNiSW: 6