

# Pomiar rezystancji powierzchniowej warstw cienkich o dowolnych kształtach wytworzonych na podłożach elastycznych

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano metody pomiarów rezystancji powierzchniowej elektrod cienkowarstwowych wytworzonych na podłożach tekstylnych z wykorzystaniem technologii osadzania próżniowego PVD. Przeanalizowano adekwatność wykorzystania metod pomiaru w zależności od różnych kształtów elektrod.

**Abstract.** The following article presents methods of surface resistance measurement of thin film electrodes formed on flexible substrates with using vacuum deposition technology - PVD. The adequacy of the use of the measurement methods to the different shapes of electrodes was analyzed. (Measurement of surface resistance of thin layers of different shapes produced on flexible substrates).

**Słowa kluczowe:** rezystancja powierzchniowa, próżniowe nanoszenie cienkich warstw, elektrody pomiarowe, metoda Van der Pauwa.

**Keywords:** surface resistance, vacuum deposition of thin layers, measuring electrodes, Van der Pauw method

doi:10.12915/pe.2014.12.58

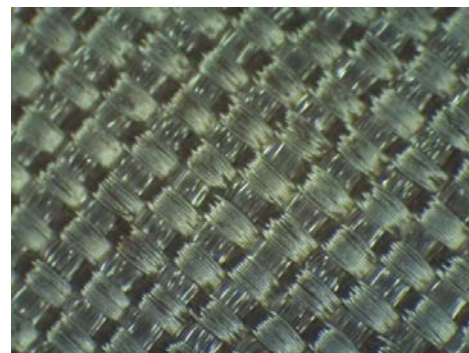
## Wstęp

Zagadnienie wytwarzania cienkich warstw elektroprzewodzących na elastycznych strukturach nabiera istotnego znaczenia dla wytwarzania specjalizowanych tekstyliów m.in. dla celów bezprzewodowej telediagnostyki i teleterapii [1,2]. Elementem kluczowym w tekstronice [3], jest aplikacja elementów elektrycznych i elektronicznych do wyrobów tekstylnych, z uwzględnieniem wielu czynników. Pierwszym obszarem koniecznym do uwzględnienia jest ochrona sygnału użytecznego przed zakłóceniami wywołanymi wpływem pól elektrycznych i elektromagnetycznych. Równocześnie należy uwzględnić zagadnienia typowo informatyczne takie choćby jak szyfrowanie danych, szybkość i bezpieczeństwo transmisji danych [4]. Dla telediagnostyki wykorzystującej elementy tekstroniczne ważnym jest więc wytwarzanie warstw przewodzących o specjalnie zaprojektowanych i wytworzonych kształtach, które mogą zostać wykorzystane jako integralne elementy systemów elektronicznych zintegrowanych z odzieżą. Kluczowym jest również dokładne określenie ich rezystancji.

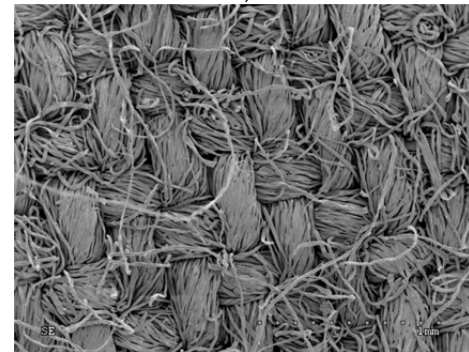
## Elektrody i metoda ich wytwarzania

Wytworzenie cienkiej warstwy przewodzącej na strukturze tekstylnej trzeba traktować jako połączenie dwóch rodzajów materiałów o zdecydowanie odmiennych właściwościach elektrycznych i mechanicznych - warstwy nanoszonej o dobrej przewodności elektrycznej oraz podłoża o właściwościach dielektrycznych. Warstwa wytwarzana na powierzchni struktury tekstylnej jest nakładana na tekstylną strukturę trójwymiarową utworzoną przez przenikające się nitki wątku i osnowy, tworzących różnorodne sploty charakterystyczne dla konkretnych wyrobów tekstylnych [5]. Istotne i charakterystyczne jest to, iż jest to złożona, nierówna powierzchnia podlegająca nieustannym zniekształceniom w trakcie użytkowania. W związku ze złożoną pod względem materiałowym i geometryczno – przestrzenną, oraz zmienną skutkiem oddziaływań mechanicznych strukturą tekstylną - uzyskanie ciągłej warstwy metalicznej o dobrych właściwościach przewodzących na podłożach tekstylnych jest trudne [5].

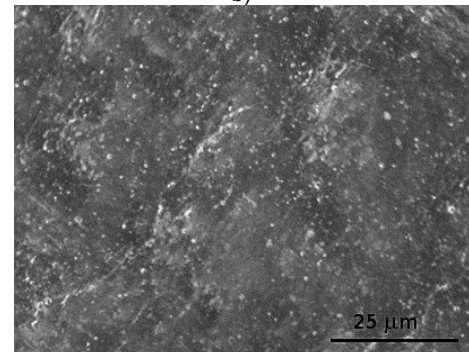
Niektóre tkaniny składają się nie tylko z włókien zorganizowanych w uporządkowany splot, ale również posiadają liczne stochastycznie rozłożone włókna na swojej powierzchni. Jest to element zakłócający wytwarzanie ciągłej warstwy przewodzącej na tekstyliach.



a)



b)



c)

Rys.1. Obraz mikroskopowy przedstawiający cienką warstwę Ag wykonaną metodą nanoszenia próżniowego na tkaninie bez zachowania ciągłości warstwy przewodzącej (powiększenie 40x) a) tafta b) bawełna c) z zachowaniem ciągłości warstwy elektroprzewodzącej na podłożu elastycznym wykonanym z nici nylonowych z pokryciem z folii poliuretanowej

Przykład takiego podłoża to struktura tkaniny bawełnianej zaprezentowanej na zdjęciu 1b.

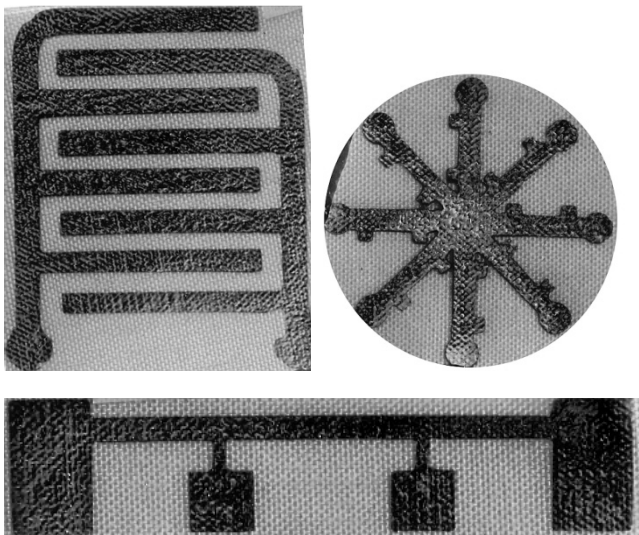
W prezentowanej pracy autorzy podjęli próbę uzyskania cienkiej warstwy elektroprowadzącej na podłożu wykonanym z nici poliestrowych (rys.1a), bawełnianym (rys.1b), oraz na podłożu elastycznym kompozytowym wykonanym z nici nylonowych z pokryciem z folii poliuretanowej o nazwie handlowej Cordura (rys.1c). Zdjęcia mikroskopowe podłoża z naniesionymi na nie warstwami metalicznymi przedstawione na zdjęciu 1, zostały wykonane przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Delta Optical SZ-630T przy powiększeniu 40x.

Warstwa osadzana w procesach fizycznych nie jest warstwą osadzaną jedynie na powierzchni wyrobu tekstylnego, lecz wnika ona w mniejszym lub większym stopniu w głąb jego struktury. Z tego względu przy wykonaniu elektrod o wysokiej wartości konduktywności celowym staje się stosowanie podłoża tekstylnych pokrytych dodatkową warstwą (na przykład poliuretanową). Poprzez wykorzystanie tego typu podłoża w trakcie nanoszenia warstw przewodzących zostaje zachowana elastyczność produktów tekstylnych, ale również zredukowane zostają niedogodności związane z porowatym układem przestrzennym nitek użytych do produkcji wyrobu tekstylnego.

W trakcie prowadzenia prac badawczych autorzy wykonali elektrody o różnych kształtach metodą osadzania próżniowego Physical Vapour Deposition PVD. W tym celu wykorzystane zostało stanowisko próżniowe Classic 250 Pfeiffer Vacuum w Instytucie Systemów Inżynierii Elektrycznej Politechniki Łódzkiej. Warunki procesu technologicznego to:

- Ciśnienie początkowe - 0.01 Pa ( $1.0 \times 10^{-4}$  mbar)
- Ciśnienie końcowe - 0.1 Pa ( $1.0 \times 10^{-3}$  mbar)
- Czas nanoszenia warstwy metalicznej - 5 min
- Materiał osadzany – miedź

Kształt wytworzonych elektrod został zaprezentowany na rysunku 2.

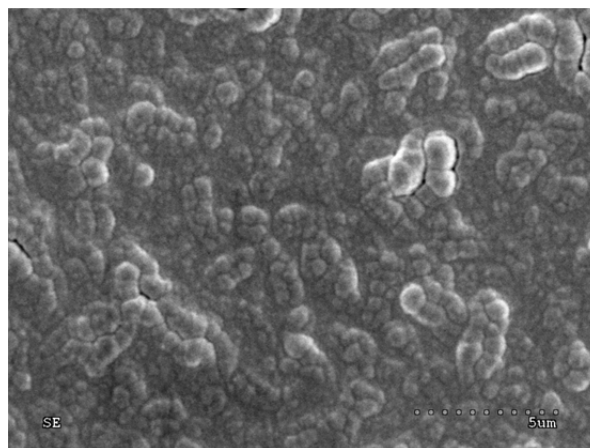


Rys.2. Zdjęcia przykładowych elektrod wytworzonych w procesie PVD na podłożu kompozytowym wykonanym z włókien nylonowych pokrytych warstwą poliuretanu a) elektroda grzebieniowa E1, b) elektroda ośmioramienna E2, c) elektroda liniowa E3

### Metody pomiarowe rezystancji

Przed przystąpieniem do wykonania pomiarów rezystancji dokonano wstępnych badań oceny jakości wytworzonej warstwy elektroprowadzącej. Do oceny

jakości podłoża użyto mikroskopu skaningowego SEM Hitachi S-4200 (powiększenie 1500x). Wyniki badań zostały zaprezentowane na rysunku 3.



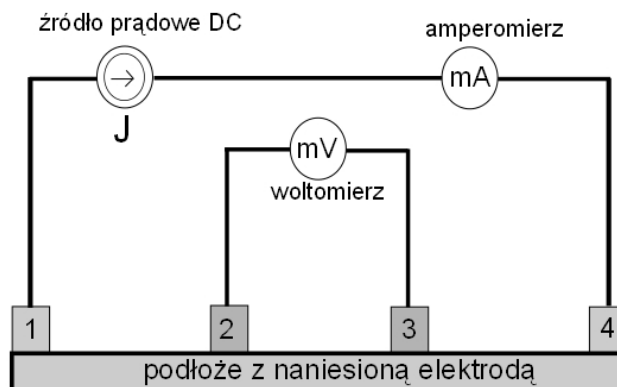
Rys.3. Obraz mikroskopowy powierzchni elektrody cienkowarstwowej wytworzonej na tekstylnym podłożu kompozytowym przy powiększeniu 1500x, mikroskop skaningowy SEM

Z analizy zdjęcia mikroskopowego wynika, że wytworzona warstwa cechuje się licznymi mikropęknięciami. Ma to wpływ na własności elektroprowadzące wytworzonych ścieżek.

Pomiary właściwości elektrycznych elektrod przedstawionych na rysunkach (2a,b,c) zostały wykonane w Zakładzie Metrologii i Diagnostyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej na wcześniej opracowanym stanowisku badawczym. Wyniki uzyskano przy użyciu 3 metod pomiarowych:

- z wykorzystaniem omomierza i układu dwuelektrodowego
- metody pomiaru rezystancji z użyciem mostka technicznego (czteroelektrodowa)
- czteroelektrodowej metody Van der Pauwa (VdP).

Na dobór metod pomiarowych rezystancji miały wpływ kształty badanych obiektów, ich grubość oraz rozmiar. Z powodu małych rozmiarów wytworzonych elektrod metoda służąca do pomiaru cienkich warstw przewodzących sugerowana w PN-EN 61340-2-3 nie znalazła tu zastosowania [6].



Rys.4. Układ do pomiaru rezystancji wytworzonych elektrod metodą czterosondową 1,4 elektrody prądowe, 2,3 elektrody napięciowe

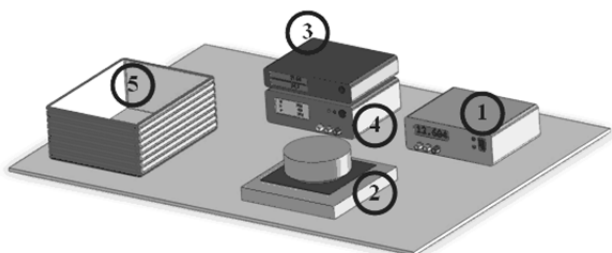
Rezystancję  $R$  w układzie pomiarowym zaprezentowanym na rysunku 4 można wyliczyć ze wzoru (1):

$$(1) \quad R = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{2-3}}{I_{1-4}} + \frac{U_{2-3}}{I_{4-1}} \right)$$

gdzie  $R$  – mierzona rezystancja,  $U$  – mierzona wartość spadku napięcia pomiędzy elektrodami 2 i 3,  $I$  – natężenie prądu pomiędzy elektrodami 1 i 4.

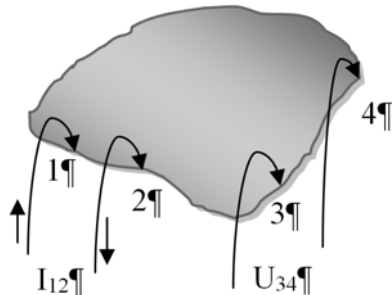
Pomiary rezystywności materiału elektrod tekstronicznych wykonano na stanowisku, którego schemat zamieszczono na rysunku 5. Stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w elektrometr marki Keithley 6417B, umożliwiający wykonywanie precyzyjnych pomiarów prądu powierzchniowego  $I_s$  oraz mostek techniczny TMW-5.

Elektrody pomiarowe składały się z zestawu 4 minielektrod zgodnych z PN-EN 61340-4-1. Próbka została poddana kondycjonowaniu przez 24 godziny w warunkach 22,5°C i wilgotności względnej 65%.

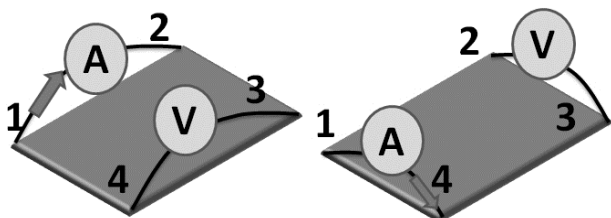


Rys. 5. Schemat stanowiska do pomiaru ładunku elektrostatycznego i rezystywności powierzchniowej [9]: 1 – elektrometr programowalny lub mostek techniczny, 2 – zestaw minielektrod, 3 – miernik wilgotności i temperatury, 4 – zasilacz stabilizowany 0+400 V, 5 – komora kondycjonowania próbek

Główną zaletą metody Van der Pauwa [7] w porównaniu do pozostałych użytych metod jest możliwość wykonania pomiarów elektrod o nieregularnych kształtach, przy spełnieniu warunku, że elektroda jest znacznie cieńsza niż jej długość i szerokość, jest jednorodna oraz nie posiada izolowanych obszarów (dziur).



Rys. 6. Pomiar rezystancji metodą Van der Pauwa w przypadku próbki o dowolnym kształcie  $I_{12}$  - wymuszony prąd pomiędzy punktami 1 i 2,  $U_{34}$  - spadek napięcia pomiędzy punktami 3 i 4



Rys. 7. Pomiar rezystancji metodą Van der Pauwa  $R_A = \frac{U_{43}}{I_{12}}$

$$\text{oraz } R_B = \frac{U_{23}}{I_{14}}$$

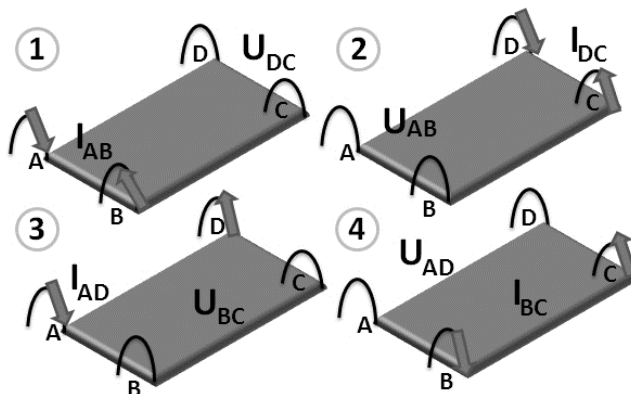
$R$  - szukana wartość rezystancji próbki wyliczana ze wzoru z uwzględnieniem metody Van der Pauwa:

$$(2) \quad e^{-\pi R_A / R} + e^{-\pi R_B / R} = 1$$

gdzie  $R_A = \frac{U_{43}}{I_{12}}$  oraz  $R_B = \frac{U_{23}}{I_{14}}$ , odpowiednie wartości

napięć i prądów zostały oznaczone na rysunku 7.

Wszystkie wymienione warunki spełnia badana elektroda tekstroniczna. W omawianym przypadku otrzymane wyniki można uznać za poprawne gdyż, nie zależą one od umiejscowienia elektrod, a ponadto przy jednym ustawieniu elektrod i zastosowaniu kombinacji styków (rys. 8) uzyskuje się 4 wyniki.



Rys. 8. Kombinacja czterech z ośmiu styków w metodzie van der Pauwa, gdy próbka nie jest jednorodna. Zamiana biegunów dodatnich i ujemnych prowadzi do permutacji:  $V_{CD}$ ,  $V_{BA}$ ,  $V_{CB}$ ,  $V_{DA}$ .

### Wyniki pomiarów

Dokonano serii 50 pomiarów rezystancji każdego kształtu elektrod. Wartości średniej rezystancji powierzchniowej wytworzonych elektrod tekstronicznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1: wartości średniej rezystancji mierzonych elektrod

Elektroda	Pomiary omomierzem	Pomiary mostkiem	Pomiary VdP
E1	58,77 Ω	69,75 Ω	93,73 Ω
E2	0,518 Ω	0,343 Ω	7,101 Ω
E3	4,278 Ω	4,615 Ω	6,588 Ω

Wyniki otrzymane za pomocą metody dwu i czterosondowej można uznać z zbliżone. Za przyczyną różnic w pomierzonych wartościach rezystancji można uznać odmienny sposób ustawienia elektrod oraz ich ilość. W przypadku metody VdP otrzymana wartość rezystancji jest znacznie większa gdyż dotyczy całego badanego obszaru, a nie jak to ma miejsce we wcześniejszych metodach, rezystancji odcinka między końcami ramion elektrody.

### Wnioski końcowe:

W prezentowanej pracy autorzy przedstawiają wyniki badań rezystancji powierzchniowej [8,9] warstw elektroprowadzących wykonanych w drodze osadzania próżniowego na podłożu elastyczne. Pomiary rezystancji możliwymi metodami dotyczą warstw o dowolnych kształtach. Poprawny pomiar rezystancji warunkuje wprowadzenie rzetelnych danych wejściowych i ustawienie ich jako wzorcowe parametry w urządzeniach zbierających i przetwarzających dane. Wytworzone warstwy w oparciu o metodę PVD mogą pełnić rolę elektrod wykorzystywanych do elektrostymulacji lub monitoringu funkcji życiowych.

Dodatkowo w przyszłości należy zbadać wpływ temperatury na wartości rezystancji elektrod ze względu na zmiany warunków środowiskowych w jakich będą one wykorzystywane. Problem wpływu warunków środowiskowych na pracę urządzeń elektrycznych został opisany np. w [10-12].

W zależności od sposobu aplikacji wytworzonych elektrod oraz od ich kształtu autorzy za właściwą metodę uznają pomiar rezystancji powierzchniowej z wykorzystaniem metody czteroelektrodowej lub metody Van der Pauwa. Przy czym metodę czteroelektrodową należy stosować dla pomiarów obiektów o nieskomplikowanym, najlepiej liniowym kształcie, z kolei metoda VdP daje bardziej wiarygodne rezultaty dla obiektów o nieregularnym, skomplikowanym kształcie.

#### LITERATURA

- [1] P. Bonato, Wearable Sensors and systems From Enabling Technology to Clinical Applications, *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, May/June 2010, pp. 25-36.
- [2] P. F. Binkley, 'The next era of examination and management of the patient with cardiovascular disease,' *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 22, pp. 23-24, May-June 2003.
- [3] Zięba J., Frydrysiak M., Błaszczak J., (2012) „Textronic clothing with resistance textile sensor to monitoring frequency of human breathing” 2012 *IEEE Symposium on Medical Measurements and Applications*, Proceedings 20 - 24
- [4] Korzeniewska E., Duraj A., Krawczyk A. „Identyfikacja wyjątków sensorycznych funkcji organizmu przy zastosowaniu nowoczesnej metody monitoringu e-włókien”, *Przegląd Elektrotechniczny* 89 (2013) 12, 123-127
- [5] Pawlak R., Korzeniewska E., Frydrysiak M., Zięba J., Tęsiowski Ł., Gniotek K., Stempień Z., Tokarska M. „Using vacuum deposition technology for the manufacturing of electroconductive layers on the surface of textiles” *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 91 (2012) no.2, 68 – 72
- [6] L. Borowik, A. Jakubas, Analiza przydatności metod pomiaru rezystancji powłok antyelektrostatycznych o nieregularnych kształtach, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), 116
- [7] Van der Pauw, L.J.: "A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape". [w:] *Philips Technical Review*, 20/1958
- [8] Borowik L., Jakubas A. Measurements and subjects antistatic protective clothing, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013) nr 12, 196-198
- [9] Borowik L., Jakubas A. Influence of edge effects on measuring of resistance of anti-static surface, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012) nr 12b, 164-166
- [10] Szczyński A. "Przydatność elektronicznych przekładników prądowych przy pracy w podwyższonej temperaturze" *Przegląd Elektrotechniczny* (2011) nr 11, 9-12
- [11] Lebioda M., Rymaszewski J. "Simulation of electromagnetic and thermal processes in superconducting systems", *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013) nr 7, 280-283
- [12] Rymaszewski J., Lebioda M., Korzeniewska E., „Propagation of normal zone in superconducting tapes due to heating in near-electrode area, *Materials Science and Engineering: B*, 176 (2011), nr 4, 334-339

---

**Authors:** PhD Ewa Korzeniewska, Lodz University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Electronics, Informatics and Automatic Control, Institute of Electrical Engineering Systems, Stefanowskiego 18/22 Street, 90-924 Łódź, Poland e-mail: ewa.korzeniewska@p.lodz.pl; PhD Adam Jakubas, Czestochowa University of Technology, Electrical Faculty, Institute of Armii Krajowej 17 Street, 42-200 Czestochowa Poland, e-mail: adam.jakubas@gmail.com