

SPOSÓB I SYSTEM DO POMIARU OPORNOŚCI POWIERZCHNIOWEJ

Opis

DZIEDZINA WYNAŁAZKU

Przedmiotem wynalazku jest sposób oraz system do pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie przy zastosowaniu pięciu kontaktów punktowych, z których trzy umieszczone są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki a dwa pozostałe w dowolnych położeniach na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki.

Niniejsze rozwiązanie według wynalazku ogólnie dotyczy dziedziny fizyki, w szczególności odnosi się do pomiaru własności elektrycznych przy użyciu urządzenia do pomiaru rezystancji, przy czym pomiar rezystancji odbywa się przy użyciu metody jednoczesnego pomiaru prądu i napięcia. Ujawniony wynalazek zasadniczo dotyczy dziedziny sond do pomiaru oporności powierzchniowej próbek o nieregularnym kształcie, a dokładniej pięciopunktowych sond do pomiaru oporności powierzchniowej, w szczególności na płytkach półprzewodnikowych.

TŁO WYNAŁAZKU

Zasadniczo oporność powierzchniowa to zdolność materiału do ograniczania przepływu prądu elektrycznego po jego powierzchni, która zależy od rodzaju materiału oraz struktury i czystości jego powierzchni. Liczbowo jest równa stosunkowi napięcia stałego przyłożonego do liniowych elektrod położonych na przeciwległych krawędziach kwadratowej próbki, stykających się z powierzchnią materiału, do wartości natężenia prądu płynącego po powierzchni między tymi elektrodami.

W sposobie Van Der Pauwa oporność powierzchniową mierzy się na kształcie o dobrze zdefiniowanej krawędzi. Ponieważ oporność powierzchniowa jest pewnego rodzaju własnością masową (lub planarną), krawędź może mieć wpływ na pomiary, ponieważ wprowadza ona granicę, która co do zasady ma inne własności od tych, które ma wewnątrz badanej próbki. Istotne jest to, że przez odpowiednią separację między stykami można zmieniać skalę przestrzenną pomiarów. Własności transportowe w pobliżu krawędzi nie muszą być takie same jak swoiste własności badanej próbki planarnej. W tym kontekście zastrzegany sposób według wynalazku przeprowadza pomiar z wykorzystaniem trzech punktów na krawędzi badanej próbki i dwóch na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki.

OPIS STANU TECHNIKI

Znany jest sposób pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie przy zastosowaniu czterech kontaktów punktowych umieszczonych w dowolnych położeniach na krawędzi próbki opisany w publikacjach autorstwa L. J. Van Der PAUW, pod tytułem „*A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape*” Philips Technical Review, vol. 20, nr. 8. str. 220–224, 1958, [1], „*A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape*” Philips Res. Reports, vol. 13, nr. 1, str. 1–9, 1958, doi: 10.1142/9789814503464_0017, [2]. W metodzie tej wyznacza się uśrednioną po całej próbce wartość oporności powierzchniowej.

W stanie techniki znane jest także polskie zgłoszenie patentowe nr P.434393 z dnia 20 czerwca 2020 r. pod tytułem „*Sposób określania oporności powierzchniowej*” oraz na bazie niego amerykańskie zgłoszenie patentowe nr US16/907,450 z dnia 22 czerwca 2020 r. pod tytułem „*A method for determining sheet resistance*”, w których ujawniony jest sposób pomiaru oporności powierzchniowej przy zastosowaniu pięciu kontaktów punktowych umieszczonych w dowolnych położeniach na powierzchni badanej próbki jednakże, co istotne z daleka od krawędzi badanej próbki w przeciwieństwie do zastrzeganego rozwiązania według wynalazku, gdzie trzy kontakty punktowe umieszczone są na krawędzi badanej próbki.

Ponadto w stanie techniki znana jest także publikacja autorstwa K. R. Szymański oraz P. A. Zaleski, pod tytułem „*Determination of the sheet resistance of an infinite thin plate with five point contacts located at arbitrary positions*”, Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 169, nr. sierpień 2020, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108360 [3], gdzie za pomocą tego sposobu można wyznaczać lokalną oporność powierzchniową. Sposobem tym nie można jednakże badać obszarów umieszczonych blisko krawędzi badanej próbki, co stanowi poważne ograniczenie dla takiego pomiaru.

Istnieje, zatem potrzeba zapewnienia nowego sposobu oraz systemu do pomiaru oporności powierzchniowej cechującego się niezależnością wyniku pomiaru od własności geometrycznych, tzn. położenia kontaktów punktowych na badanej próbce, w szczególności niewrażliwości na położenia kontaktów punktowych w pobliżu krawędzi próbki.

Zatem celem niniejszego wynalazku jest opracowanie całkowicie nowego rozwiązania niejako alternatywnego sposobu określania oporności powierzchniowej polegającego na sposobie oraz systemie pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie przy zastosowaniu pięciu kontaktów punktowych, spełniającego powyższe zapotrzebowanie.

ISTOTA WYNALAZKU

Przedmiotem niniejszego wynalazku jest opracowanie całkowicie nowego rozwiązania w postaci sposobu oraz systemu do pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie przy zastosowaniu pięciu kontaktów punktowych, z których trzy umieszczone są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki a dwa pozostałe w dowolnych położeniach na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki.

Sposób według wynalazku obejmuje zatem zastosowanie pięciu sond położonych w taki sposób, aby trzy z nich zostały zlokalizowane na krawędzi próbki a dwie pozostałe w dowolnym położeniu na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki daleko od krawędzi próbki, lecz w niemal dowolnych położeniach. Pomiar z użyciem pięciu sond co do zasady daje więcej informacji niż pomiary z czterema kontaktami niezależnie od tego gdzie zostałyby zlokalizowane sondy.

Istotę wynalazku określa sposób pomiaru oporności powierzchniowej przeznaczony, w szczególności do próbki o nieregularnym kształcie według zastrzeżenia 1. Zastrzeżenia zależne 2-4 dotyczą poszczególnych przykładów wykonania wynalazku według zastrzeżenia 1. Zastrzeżenie 5 określa system do pomiaru oporności powierzchniowej przeznaczony, w szczególności do próbki o nieregularnym kształcie według zastrzeżenia 1. Zastrzeżenia zależne 6-7 dotyczą poszczególnych przykładów wykonania wynalazku według zastrzeżenia 5.

W celu osiągnięcia powyższych celów, zgodnie z jednym z aspektów niniejszego wynalazku, niniejszy wynalazek zapewnia sposób pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie przy zastosowaniu pięciu kontaktów punktowych do pomiaru pięciu czteropunktowych oporności powierzchniowych, charakteryzuje się tym, że sposób obejmuje następujące etapy:

- a. pozycjonuje się trzy kontakty punktowe (α , β , γ) w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki, a pozostałe dwa kontakty punktowe (δ , ε) pozycjonuje się w dowolnych położeniach na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki,
- b. wyznacza się oporność powierzchniową na podstawie teorii przewidującej rozkłady prądów i napięć w układzie z kontaktami punktowymi (α , β , γ) na krawędzi oraz z kontaktami punktowymi (δ , ε) na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki poprzez wyznaczenie pięciu czteropunktowych oporności powierzchniowych ($r_{\alpha\beta\gamma\delta}$, $r_{\beta\gamma\delta\varepsilon}$, $r_{\gamma\delta\varepsilon\alpha}$, $r_{\delta\varepsilon\alpha\beta}$, $r_{\varepsilon\alpha\beta\gamma}$) w oparciu o przepuszczenie prądu pomiędzy dwoma kontaktami punktowymi (α , β) oraz pomiar różnicy potencjałów pomiędzy dwoma kontaktami punktowymi (γ , δ) dla pierwszej z pięciu czteropunktowych oporności powierzchniowych, a następnie analogicznie w czterech pozostałych przypadkach, przy czym położenia kontaktów punktowych (δ , ε) na powierzchni badanej próbki oraz położenia kontaktów punktowych (α , β , γ) na krawędzi badanej próbki nie zmieniają się podczas wykonywania tych pomiarów, w oparciu o numeryczne równanie nieliniowe na oporność powierzchniową:

$$u_{\alpha} + u_{\gamma} + u_{\delta} + u_{\varepsilon} - u_{\alpha}u_{\gamma}(1 + u_{\delta} + u_{\varepsilon}) - (1 - u_{\alpha}u_{\gamma})(u_{\alpha}u_{\delta} + u_{\gamma}u_{\varepsilon}) - u_{\beta}^2u_{\delta}u_{\varepsilon} = 1, \quad \text{Równanie (2)}$$

w którym $u_i = \exp(-2\pi r_i/\rho)$, $i = \alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ oraz $r_{\alpha} = r_{\beta\gamma\delta\varepsilon}$, $r_{\beta} = r_{\gamma\delta\varepsilon\alpha}$, $r_{\gamma} = r_{\delta\varepsilon\alpha\beta}$, $r_{\delta} = r_{\varepsilon\alpha\beta\gamma}$, $r_{\varepsilon} = r_{\alpha\beta\gamma\delta}$.

Korzystnie wspomniany trzy kontakty punktowe (α , β , γ) pozycjonowane są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki tworząc trójkąt.

Korzystnie wspomniany wykonuje się skan powierzchni badanej próbki przy użyciu dwóch kontaktów punktowych (δ , ϵ) i wyznacza się rozkład oporności powierzchniowej.

5 Korzystnie wspomniany wykonuje się skan powierzchni przy użyciu dwóch kontaktów punktowych (δ , ϵ) i wyznacza się położenia wtrąceń w badanej próbce.

10 Zgodnie z jednym z aspektów niniejszego wynalazku, niniejszy wynalazek zapewnia system do pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie, zawiera multiplekser połączony z zasilaczem prądowym, miernikiem, analizatorem danych oraz pięć kontaktów punktowych (α , β , γ , δ , ϵ) do pozycjonowania na badanej próbce, z tym że:

trzy kontakty punktowe (α , β , γ) pozycjonowane są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki, zaś pozostałe dwa kontakty punktowe (δ , ϵ) pozycjonowane są w dowolnych położeniach na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki, przy czym kontakty punktowe (α , β , γ , δ , ϵ) do pozycjonowania na badanej próbce, wychodzą z multipleksera, który podaje prąd z zasilacza prądowego na określone kontakty punktowe oraz podłącza do odpowiednich kontaktów punktowych miernik przystosowany do pomiaru natężenia prądu i napięcia w sposób umożliwiający wyznaczenie pięciu czteropunktowych oporności powierzchniowych ($r_{\alpha\beta\gamma\delta}$, $r_{\beta\gamma\delta\epsilon}$, $r_{\gamma\delta\epsilon\alpha}$, $r_{\delta\epsilon\alpha\beta}$, $r_{\epsilon\alpha\beta\gamma}$);

zaś odczytane dane prądów i napięć przesyłane są do analizatora danych przystosowanego do akwizycji i analizy danych przy użyciu którego dokonuje się analizy na podstawie pięciu czteropunktowych oporności powierzchniowych ($r_{\alpha\beta\gamma\delta}$, $r_{\beta\gamma\delta\epsilon}$, $r_{\gamma\delta\epsilon\alpha}$, $r_{\delta\epsilon\alpha\beta}$, $r_{\epsilon\alpha\beta\gamma}$), z tym, że:

oporność powierzchniową wyznacza się na podstawie teorii przewidującej rozkłady prądów i napięć w układzie z kontaktami punktowymi (α , β , γ) na krawędzi oraz z kontaktami punktowymi (δ , ϵ) na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki, poprzez rozwiązywanie, w analizatorze danych, numerycznego równania nieliniowego na oporność powierzchniową:

$$\begin{aligned} & u_\alpha + u_\gamma + u_\delta + u_\epsilon - u_\alpha u_\gamma (1 + u_\delta + u_\epsilon) \\ & - (1 - u_\alpha u_\gamma)(u_\alpha u_\delta + u_\gamma u_\epsilon) - u_\beta^2 u_\delta u_\epsilon = 1, \end{aligned} \quad \text{Równanie (2)}$$

w którym $u_i = \exp(-2\pi r_i/\rho)$, $i = \alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ oraz $r_\alpha = r_{\beta\gamma\delta\epsilon}$, $r_\beta = r_{\gamma\delta\epsilon\alpha}$, $r_\gamma = r_{\delta\epsilon\alpha\beta}$, $r_\delta = r_{\epsilon\alpha\beta\gamma}$, $r_\epsilon = r_{\alpha\beta\gamma\delta}$.

Korzystnie wspomniany trzy kontakty punktowe (α , β , γ) pozycjonowane są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki tworząc trójkąt.

15 Korzystnie wspomniany badaną próbkę stanowi próbka o nieregularnym kształcie, wykonana z cienkiego, jednorodnego materiału przewodzącego, niezawierającego dziur, korzystnie w kształcie koła.

Korzyści i skutki wynalazku

Korzystną cechą sposobu według wynalazku jest możliwość pomiaru lokalnej oporności powierzchniowej poprzez wykonywanie skanu przy użyciu tylko dwóch kontaktów punktowych. Ponadto sposób według wynalazku jest niewrażliwy na odległość skanujących kontaktów punktowych od krawędzi badanej próbki.

Nowością sposobu według wynalazku jest to, że wyznacza się oporność powierzchniową lokalnie i sposób ten daje poprawne wyniki pomiaru niezależnie od tego czy kontakty punktowe skanujące są blisko czy daleko od krawędzi badanej próbki.

W świetle powyższego, rozwiązanie według zaproponowanego sposobu pozwala ograniczyć, a wręcz wyeliminować konieczność precyzyjnego położenia kontaktów punktowych na badanej próbce pozwalając uzyskać wyniki niezależne od precyzyjnego położenia kontaktów punktowych.

Niewątpliwą zaletą zastrzeganego rozwiązania w postaci sposobu pomiaru oporności powierzchniowej jest także możliwość jego zastosowania do próbek o nieregularnym kształcie, co w stanie techniki do tej pory nie było takie jednoznaczne.

Dodatkowo w przypadku testowania jednorodności badanych próbek w liniach produkcyjnych, zastrzegany sposób będzie miała przewagę nad znanymi sposobami ponieważ skanowanie dwoma blisko siebie leżącymi kontaktami punktowymi umożliwi wykrywanie niejednorodności oraz to wykrywanie będzie miało taką samą precyzję, niezależnie od tego, jak daleko będzie znajdować się krawędź badanej próbki od skanujących kontaktów punktowych.

KRÓTKI OPIS RYSUNKÓW

Przedmiot wynalazku uwidoczniony jest w przykładzie wykonania, w odniesieniu do załączonych rysunków, na których:

Fig. 1 przedstawia układ pięciu kontaktów punktowych zdefiniowanych według wynalazku, gdzie trzy kontakty punktowe umieszczone są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki o nieregularnym kształcie, a dwa pozostałe kontakty punktowe gdziekolwiek na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki o nieregularnym kształcie, pokazanych odpowiednio na Fig. 1a, 1b, 1c, 1d oraz 1e;

Fig. 2 przedstawia odpowiednio na Fig. 2a układ pięciu kontaktów punktowych zdefiniowanych według wynalazku na próbce o nieregularnym kształcie bez dziur, oraz na Fig. 2b prądy i potencjały odpowiadające kontaktom punktowym przewidywanym przez teorię odwzorowań konforemnych;

Fig. 3 przedstawia schemat systemu do pomiaru oporności powierzchniowej według wynalazku;

Fig. 4 przedstawia wykres z wynikami pomiarów oporności powierzchniowej właściwej w zależności od położenia dwóch kontaktów punktowych na średnicy koła;

Fig. 5 przedstawia wykres z wykonaną symulacją komputerową metodą elementów skończonych, w których potwierdzono poprawność sposobu według wynalazku

oraz według Równania (2);

Fig. 6 przedstawia wykres z wynikami obliczeń oporności powierzchniowej dla próbki o nieregularnym kształcie;

5 **Fig. 7** przedstawia wykres ilustrujący sposób według wynalazku poprawnie lokalizuje niejednorodności.

OPIS SZCZEGÓŁOWY WYNALAZKU

Poniżej, opisano szczegółowo przedmiot niniejszego wynalazku w odniesieniu do załączonych Figur i przykładów wykonania. Niniejszy wynalazek nie ogranicza się jedynie do szczegółowych przykładów wykonania tutaj opisanych.

10 Sposób pomiaru oporności powierzchniowej według wynalazku polega na umieszczeniu trzech kontaktów punktowych (oznaczone literami α , β , γ jak na Fig. 1a) w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki 1, oraz dwóch pozostałych kontaktów punktowych (oznaczone literami δ , ε jak na Fig. 1a) gdziekolwiek na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki 1. Następnie dokonuje się pomiaru oporności
15 czteropunktowej $r_{\alpha\beta\gamma\delta}$, co jest przedstawione schematycznie na Fig. 1a, gdzie przepuszczany jest prąd $j_{\alpha\beta}$ pomiędzy kontaktami punktowymi α , β oraz mierzy się różnicę potencjałów $V_\delta - V_\gamma$ pomiędzy kontaktami punktowymi γ , δ . Oporność czteropunktowa wynosi $r_{\alpha\beta\gamma\delta} = (V_\delta - V_\gamma) / j_{\alpha\beta}$. Analogicznie mierzymy pozostałe oporności czteropunktowe $r_{\beta\gamma\delta\varepsilon}$, $r_{\gamma\delta\varepsilon\alpha}$, $r_{\delta\varepsilon\alpha\beta}$, $r_{\varepsilon\alpha\beta\gamma}$, gdzie sposób podłączenia zasilacza prądowego
20 oraz woltomierza do odpowiednich kontaktów punktowych jest przedstawiony na Fig. 1b, 1c, 1d oraz 1e. Koniecznym jest aby położenia kontaktów punktowych δ , ε na powierzchni i kontaktów punktowych α , β , γ na krawędzi badanej próbki 1 nie zmieniały się w trakcie wykonywania pięciu różnych pomiarów przedstawionych na Fig. 1a, 1b, 1c, 1d oraz 1e.

Dalej wprowadzamy oznaczenia:

25

$$\begin{aligned} u_\alpha &= \exp\left(-\frac{2\pi r_{\beta\gamma\delta\varepsilon}}{\rho}\right), \\ u_\beta &= \exp\left(-\frac{2\pi r_{\gamma\delta\varepsilon\alpha}}{\rho}\right), \\ u_\gamma &= \exp\left(-\frac{2\pi r_{\delta\varepsilon\alpha\beta}}{\rho}\right), \\ u_\delta &= \exp\left(-\frac{2\pi r_{\varepsilon\alpha\beta\gamma}}{\rho}\right), \\ u_\varepsilon &= \exp\left(-\frac{2\pi r_{\alpha\beta\gamma\delta}}{\rho}\right), \end{aligned} \quad \text{Równanie (1)}$$

gdzie ρ jest pewnym nieznanym parametrem o wymiarze oporu powierzchniowego. Parametr ρ jest niewiadomą równania nieliniowego:

$$\begin{aligned} u_\alpha + u_\gamma + u_\delta + u_\varepsilon - u_\alpha u_\gamma (1 + u_\delta + u_\varepsilon) \\ - (1 - u_\alpha u_\gamma)(u_\alpha u_\delta + u_\gamma u_\varepsilon) - u_\beta^2 u_\delta u_\varepsilon = 1, \end{aligned} \quad \text{Równanie (2)}$$

30

które należy rozwiązać korzystając z metod numerycznych. Wartość ρ spełniająca powyższe równanie jest opornością powierzchniową badanej próbki. Uzasadnienie równania (2) bierze się z teorii przepływów prądów w jednorodnych układach dwuwymiarowych i jest przedstawione poniżej.

5 Rozważamy próbkę 1 o nieregularnym kształcie, wykonaną z cienkiego, jednorodnego materiału przewodzącego. Próbka 1 nie może zawierać dziur. Umieszczamy pięć kontaktów punktowych przedstawionych na Fig. 2a: kontakty punktowe α' , β' , γ' w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki 1, natomiast kontakty punktowe δ' , ε' w dowolnych położeniach na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki 1.

10 W świetle powyższego z teorii odwzorowań konforemnych wiadomo, że dla dowolnego kształtu bez dziury rozpatrywanego na płaszczyźnie zespolonej istnieje taka funkcja analityczna $f(z)$, że obrazem tego kształtu będzie górna półpłaszczyzna. Obrazami punktów α' , β' , γ' leżących na krawędzi badanej próbki 1 o nieregulowanym kształcie (patrz Fig. 2a) będą punkty $f(\alpha')$, $f(\beta')$, $f(\gamma')$ leżące na osi rzeczywistej płaszczyzny zespolonej. Korzystając z przekształcenia Möbiusa można dokonać transformacji, w której
15 $f(\alpha')$ przejdzie w punkt $\alpha = (-1,0)$, $f(\beta')$ przejdzie w $\beta = (0,0)$, natomiast $f(\gamma')$ przejdzie w $\gamma = (1,0)$, co jest pokazane na Fig. 2b. Obrazami punktów $f(\delta')$ oraz $f(\varepsilon')$ w tej transformacji Möbiusa będą punkty $\delta = (\delta_x, \delta_y)$ i $\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y)$, odpowiednio (Fig. 2b).
20 Rozważana funkcja analityczna $f(z)$ oraz przekształcenie Möbiusa są odwzorowaniami konforemnymi na płaszczyźnie zespolonej. Z tego powodu prądy i potencjały odpowiadające kontaktom punktowym w punktach α' , β' , γ' , δ' , ε' zgodnie z Fig. 2a będą takie same jak w punktach α , β , γ , δ , ε układu przedstawionego na Fig. 2b.

Korzystając z metody obrazów znanej z elektrostatyki można wyznaczyć oporność czteropunktową dla kontaktów punktowych α , β , γ , δ umieszczonych w dowolnych
25 położeniach leżących na górnej półpłaszczyźnie $\{(x, y): y \geq 0\}$:

$$r_{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{|\alpha\gamma| |\beta\delta|}{|\alpha\delta| |\beta\gamma|} + \ln \frac{|\alpha''\gamma| |\beta''\delta|}{|\alpha''\delta| |\beta''\gamma|} \right), \quad \text{Równanie (3)}$$

gdzie $\alpha = (\alpha_x, \alpha_y)$, $\alpha'' = (\alpha_x, -\alpha_y)$, $|\alpha\gamma|$ jest odległością euklidesową pomiędzy punktami α i γ , a pozostałe symbole w Równaniu (3) są definiowane analogicznie.

30 Korzystając z Równania (3) oraz z wprowadzonych oznaczeń w Równaniu (1), dla kontaktów punktowych pokazanych na Fig. 2b otrzymujemy następujący układ Równań:

$$u_\alpha = \frac{((1 - \delta_x)^2 + \delta_y^2)(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2)}{((1 - \varepsilon_x)^2 + \varepsilon_y^2)(\delta_x^2 + \delta_y^2)}, \quad \text{Równanie (4)}$$

$$u_\beta = \frac{4\sqrt{(\delta_x - \varepsilon_x)^2 + (\delta_y + \varepsilon_y)^2}\sqrt{(\delta_x - \varepsilon_x)^2 + (\delta_y - \varepsilon_y)^2}}{((1 - \varepsilon_x)^2 + \varepsilon_y^2)((1 - \delta_x)^2 + \delta_y^2)}, \quad \text{Równanie (5)}$$

$$u_\gamma = \frac{(\delta_x^2 + \delta_y^2)((1 + \varepsilon_x)^2 + \varepsilon_y^2)(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2)}{((1 + \delta_x)^2 + \delta_y^2)(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2)}, \quad \text{Równanie (6)}$$

$$u_\delta = \frac{((1 - \varepsilon_x)^2 + \varepsilon_y^2)}{4(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2)}, \quad \text{Równanie (7)}$$

$$u_\varepsilon = \frac{(\delta_x^2 + \delta_y^2)}{4((1 + \delta_x)^2 + \delta_y^2)}. \quad \text{Równanie (8)}$$

5 Po wyeliminowaniu z układu Równań od (4) do (8) współrzędnych ε_x , ε_y , δ_x , δ_y , otrzymujemy istotne dla wynalazku Równanie (2).

Na Fig. 3 przedstawiony jest schemat systemu do pomiaru oporności powierzchniowej według wynalazku. W przedstawionym przykładzie wykonania system wyposażony jest w multiplekser 2 połączony z zasilaczem prądowym 3, miernikiem 4 oraz analizatorem danych 5

10 W zilustrowanym przykładzie wykonania do badanej próbki 1 o nieregularnym kształcie podłącza się pięć kontaktów punktowych wychodzących z multipleksera 2, przy czym trzy kontakty punktowe umieszcza się w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki 1 a dwa pozostałe kontakty punktowe umieszcza się w dowolnych położeniach na powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki 1. Następnie multiplekser 2 podaje prąd z zasilacza prądowego 3 na określone kontakty punktowe oraz podłącza do odpowiednich kontaktów punktowych miernik 4, który jest przystosowany do pomiaru natężenia prądu i napięcia. Dane dotyczące prądów i napięć przesyłane są do analizatora danych 5 przystosowanego do akwizycji i analizy danych, który współpracuje bezpośrednio z multiplekserem 2. W analizatorze danych 5 rozwiązywane jest numerycznie Równanie (2).

20 Wykorzystując sposób oraz system według wynalazku przeprowadzono pomiary na próbce 1. W przykładzie wykonania próbka 1 była w kształcie koła o średnicy 150 mm wykonana ze stopu Cr-Co-Fe-Al o wysokiej oporności. Trzy kontakty punktowe (α , β , γ) zostały umieszczone na krawędzi badanej próbki 1 tworząc trójkąt. Dwa pozostałe kontakty punktowe (δ , ε) zostały umieszczone w odległości 2mm jeden od drugiego. Wykonywano pomiar oporności powierzchniowej, a następnie zmieniano położenia tych dwóch kontaktów punktowych (δ , ε) tak, że leżały one ciągle na ustalonej prostej przechodzącej przez średnicę koła. Wyniki pomiarów oporności powierzchniowej właściwej w zależności od położenia dwóch kontaktów punktowych na średnicy koła przedstawione są na Fig. 4, a wartości liczbowe dla przeprowadzonego pomiaru oporności powierzchniowej na próbce 1 pokazano w Tabeli 1 poniżej.

Tabela 1

położenie na średnicy	opór powierzchniowy [mΩ]
0	0.0264
4	0.0265
8	0.0266
12	0.0266

położenie na średnicy	opór powierzchniowy [mΩ]
16	0.0267
20	0.0267
24	0.0267
28	0.0267
32	0.0267
36	0.0268
40	0.0268
44	0.0269
48	0.0269
52	0.0269
56	0.0269
60	0.0269
68	0.0269
72	0.0268
76	0.0269
80	0.027
88	0.0271
92	0.0272
96	0.0272
100	0.0272
104	0.0272
108	0.0273
112	0.0273
116	0.0274
120	0.0274
124	0.0275
128	0.0282

Przeprowadzono także symulacje komputerowe metodą elementów skończonych, w których potwierdzono poprawność sposobu według wynalazku oraz według Równania (2), co przedstawione zostało na Fig. 5, a wartości liczbowe dla przeprowadzonej symulacji pokazano w Tabeli 2 poniżej.

5

Tabela 2

położenie na średnicy [mm]	błąd numeryczny [μΩ]
0.0000	0.0006365
2.5000	0.000486
5.0000	0.001022
7.5000	0.0009898
10.0000	0.0009805
12.5000	0.00109
15.0000	0.000751
17.5000	0.0008963
20.0000	0.001029
22.5000	0.0008523
25.0000	0.00076
27.5000	0.0007257
30.0000	0.0006184
32.5000	0.0007287
35.0000	0.0006944

położenie na średnicy [mm]	błąd numeryczny [$\mu\Omega$]
37.5000	0.000596
40.0000	0.0005245
42.5000	0.0004649
45.0000	0.0005484
47.5000	0.0003815

5 Poprzez analizę rozkładu prądów i potencjałów dla ustalonych położenia kontaktów punktowych wyznaczano wartość oporności powierzchniowej ρ badanej próbki 1 o zadanej wartości oporności powierzchniowej ρ_0 . Parametr r na Fig. 5 przedstawia położenie pary kontaktów punktowych (δ , ε) na promieniu kołowej próbki 1. Na Fig. 6 przedstawiono wyniki obliczeń oporności powierzchniowej dla badanej próbki 1 o nieregularnym kształcie. Dodatkowo wartości liczbowe zostały zilustrowane w Tabeli 3 poniżej.

Tabela 3

położenie na linii skanu [mm]	opór powierzchniowy [$\mu\Omega$]
-24.3964	99.9992
-21.8964	99.9991
-19.3964	99.9990
-16.8964	99.9991
-14.3964	99.9990
-11.8964	99.9990
-9.3964	99.9988
-6.8964	99.9989
-4.3964	99.9988
-1.8964	99.9990
0.6036	99.9987
3.1036	99.9989
5.6036	99.9990
8.1036	99.9990
10.6036	99.9987
13.1036	99.9986
15.6036	99.9988
18.1036	99.9987
20.6036	99.9989
23.1036	99.9991
25.6036	99.9988
28.1036	99.9990
30.6036	99.9991
33.1036	99.9991
35.6036	99.9991
38.1036	99.9989
40.6036	99.9990
43.1036	99.9991
45.6036	99.9990
48.1036	99.9989

10 W końcu przeprowadzono także symulacje komputerowe metodą elementów skończonych, w których pokazano użyteczność sposobu według wynalazku do badania rozkładu przestrzennego niejednorodności oporności powierzchniowej. Na jednorodnej

5 próbce 1 oporności powierzchniowej ρ_0 w pewnych położeniach umieszczono obszary o oporności większej lub mniejszej od oporności powierzchniowej ρ_0 . Następnie metodami elementów skończonych dokonywano przewidywania wyników pomiarowych sposobem według wynalazku, gdy dwa blisko siebie leżące kontakty punktowe (δ , ε) przesuwa się wzdłuż linii przechodzącej przez niejednorodności. Na Fig. 7 pokazano, że sposób według wynalazku poprawnie lokalizuje niejednorodności. Dodatkowo wartości liczbowe zostały zilustrowane w Tabeli 4 poniżej.

Tabela 4

położenie na linii skanu [mm]	opór referencyjny [$\mu\Omega$]	opór powierzchniowy [$\mu\Omega$]
-24.3964	100	99.9989
-23.1464	100	99.9987
-21.8964	100	99.9990
-20.6464	100	99.9991
-19.3964	100	99.9983
-18.1464	100	99.9986
-16.8964	100	99.9994
-15.6464	100	99.9984
-14.3964	100	99.9994
-13.1464	100	99.9986
-11.8964	100	100.0000
-10.6464	100	99.9977
-9.3964	100	99.9998
-8.1464	100	99.9973
-6.8964	100	99.9977
-5.6464	100	99.9991
-4.3964	100	99.9990
-3.1464	100	99.9978
-1.8964	100	99.9995
-0.6464	100	99.9993
0.6036	100	99.9976
1.8536	100	99.9984
3.1036	100	99.9980
4.3536	100	99.9987
5.6036	100	99.9994
6.8536	100	100.0006
8.1036	100	99.9981
9.3536	100	99.9990
10.6036	100	99.9992
11.8536	100	99.9992
13.1036	100	99.9998
14.3536	100	100.0017
15.6036	100	100.0014
16.8536	100	100.0058
18.1036	100	100.0148
19.3536	100	100.0404
20.6036	100	100.1350
21.8536	100	100.7087
23.1036	110	103.6311
24.3536	110	104.3404
25.6036	110	104.3464

położenie na linii skanu [mm]	opór referencyjny [$\mu\Omega$]	opór powierzchniowy [$\mu\Omega$]
26.8536	110	103.7480
28.1036	100	100.7992
29.3536	100	100.1760
30.6036	100	100.0517
31.8536	100	99.9945
33.1036	100	99.8935
34.3536	100	99.3534
35.6036	90	96.5748
36.8536	90	96.0023
38.1036	90	95.9912
39.3536	90	96.4088
40.6036	100	98.9381
41.8536	100	99.7072
43.1036	100	99.8767
44.3536	100	99.9313
45.6036	100	99.9561
46.8536	100	99.9684
48.1036	100	99.9750
49.3536	100	99.9802

- Powyższy opis przedstawionych przykładów wykonania jest dostarczony w celu umożliwienia znawcy w tej dziedzinie zrealizowanie lub wykorzystanie niniejszego wynalazku. Możliwe są także różne modyfikacje przedstawionych przykładów wykonania obejmujące wszystkie takie zmiany, modyfikacje i odmiany, które wchodzą w obszar istoty i zakresu załączonych zastrzeżeń patentowych. Podstawowe zasady tu określone mogą być, zatem zastosowane w innych przykładach wykonania bez wykraczania poza zakres wynalazku. Zatem, zamierzeniem niniejszego wynalazku nie jest ograniczanie go do przykładów wykonania tu przedstawionych, ale aby był zgodny z najszerszym zakresem odpowiadającym przedstawionym tu zasadom i nowym cechom.
- 5
- 10 Niniejsze rozwiązanie według wynalazku oferuje, zatem przy użyciu wyżej wymienionych środków technicznych, jak wskazano w opisie oraz na Figurach sposób oraz system do pomiaru oporności powierzchniowej próbki o nieregularnym kształcie przy zastosowaniu pięciu kontaktów punktowych, z których trzy umieszczone są w dowolnych położeniach na krawędzi badanej próbki a dwa pozostałe w dowolnych położeniach na
- 15 powierzchni ograniczonej krawędzią badanej próbki z wykorzystaniem zaprojektowanych elementów oraz obwodów.

ZASTOSOWANIE WYNALAZKU

- Wynalazek może znaleźć zastosowanie w wielu branżach w szczególności branży pomiarowej dla narzędzi / instrumentów pomiarowo – badawczych, a zatem wszędzie tam gdzie zachodzi konieczność analizowania stanu powierzchni oceniania jej morfologii
- 20 przykładowo, w mikroskopii skaningowej wykorzystywanej powszechnie w biologii, medycynie, fizyce, materiałoznawstwie i chemii.

Przedmiotowy sposób oraz system według wynalazku znajdzie poza tym zastosowanie w szczególności do kontrolowania własności warstw metalicznych

deponowanych na polimerach, ale nie przekreśla to innych warstw metalicznych, na których może być zastosowany. Ponadto może być zastosowany do pomiaru oporności powierzchniowej warstw sferycznych. Przedmiotowy sposób według wynalazku może być odpowiedni do tego typu pomiarów i może być potencjalnie stosowany do obiektów o wymiarach mikrometrycznych i nanometrycznych, ponieważ wyniki pomiaru nie zależą od pozycji sond, w tych przypadkach trudnych do kontrolowania.


WYKAZ OZNACZEŃ ODSYŁAJĄCYCH

- 1 próbka
- 2 multiplekser
- 10 3 zasilacz prądowy
- 4 miernik
- 5 analizator danych

15

Uniwersytet w Białymstoku
Politechnika Białostocka

Pełnomocnik:


Dokument
podpisany przez
Andrzej Rosa
Data: 2022.12.30
23:08:14 CET

Andrzej Rosa
Rzecznik Patentowy