

измерителей составляющих иммитанса для средств параметрического контроля полупроводниковых структур: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.05 / ЛПИ. – Львов: 1989. 13 Huang S.M. et al. Tomographic imaging of industrial process equipment – design of capacitance sensing electronics for oil and gas based processes // Tomographic Techniques. – 1993. – P.117–202. 14. Kneller V. Development trends and problems in A.C. circuit parameters measurements In: Proc. of

the XIV IMEKO World Congress. Tampere (Finland). – 1997. – Vol. 4A. – P.183–188. 15. Test & Measurement // Catalogue Hewlett Packard.- 1999.- 627 p. 16. Riu P., Rosell J., Lozano A., Pallas-Areny R. Impedance Spectroscopy System Based on Electrical Impedance Tomography Measurements // World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. – Rio de Janeiro (Brazil). – 1994. – P. 600–612.

УДК 539.23:537.311.3.082.7

ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ КОНТАКТНИХ ОПОРІВ ТА ЇХНІХ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ТОНКИХ ПЛІВКАХ

© Ющук Степан¹, Юр'єв Сергій¹, Юречко Роман¹, Ніколайчук В.Й.², 2006

¹Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра фізики, м. Львів

²Національний університет водного господарства і природокористування, м. Рівне

Запропоновано способи вимірювання і вимірювальні схеми, які застосовувались під час вимірювання перехідних контактних опорів та їхніх вольт-амперних характеристик на тонких плівках. Здійснена оцінка точностей вимірювання.

Предложено способы и измерительные схемы, которые использовались для измерения переходных вольт-амперных характеристик на тонких пленках.

Выполнена оценка точности измерения. .

A measuring method and measuring schemes which were used for measuring of transitional contact resistances and their volt–current characteristics on thin films is presented. The estimation of measuring exactnesses has been carried out.

1. Постановка проблеми та ціль статті. Останнім часом бурхливо розвиваються сенсорна електроніка та мікросистемні технології. Про популярність цього наукового напрямку говорить проведення в 2006 р. у м. Одеса Другої міжнародної науково-технічної конференції з аналогічною назвою. Залежно від призначення сенсори фізичних величин можуть створюватись на основі монокристалів напівпровідникових [1,2], феритових [3] матеріалів та інтерметалічних сполук, зокрема і в тонкоплівковому виконанні [4]. Для підключення цих приладів до вимірних схем використовують точкові або планарні контакти типу метал–метал або метал–напівпровідник, електричні опори яких і їхні температурні залежності повинні враховуватись [5]. Важливою є також інформація про те, чи ці контакти є омичними [6,7].

Однак науковці, які працюють над створенням сенсорів фізичних величин, не завжди володіють методами вимірювань перехідних контактних опорів (ПКО) та їхніх вольт–амперних характеристик. Ми

пропонуємо два порівняно прості і прецизійні методи вимірювання ПКО на постійному струмі. Ці методи нами апробовані на тонкоплівкових контактах метал–метал, але, на наш погляд, можуть бути використані для контролю планарних і точкових контактів типу метал–напівпровідник.

2. Виклад основного матеріалу

2.1. Вимірювання електричного опору тонкоплівкових контактів мостовим методом. Для вимірювання перехідного опору r_k між резистивною плівкою і контактною смужкою застосовано метод чотириплечого моста, одним з плечей якого є вимірюваний опір (рис. 1, а). Вимірювання виконували на тонкоплівкових резисторах зі сплаву МЛТ–3М завтовшки 650 \AA , нанесених випаровуванням у вакуумі $10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ на підкладки з полірованого скла. Контактні смужки завтовшки 900 \AA отримували напиленням алюмінію. Для вимірювання контактного опору достатньо нанести три смужки. Для під'єднання

до мостової схеми до кожної контактної смужки приварювали здвоєну золоту дротину діаметром 0,03 мм. В інші три плеча моста вмикали магазини опорів R_1 , R_2 і R_n типу МСР-60М класу точності 0,02. Плече K_3M моста складається з струмовиводу K_3D і магазину R_2 ; плече K_1N – з струмовиводу K_1B і магазину R_1 . Опори струмовиводів K_3C і K_1A ввімкнені відповідно в діагоналі гальванометра і живлення схеми. Робочий струм становив 5...10 мА.

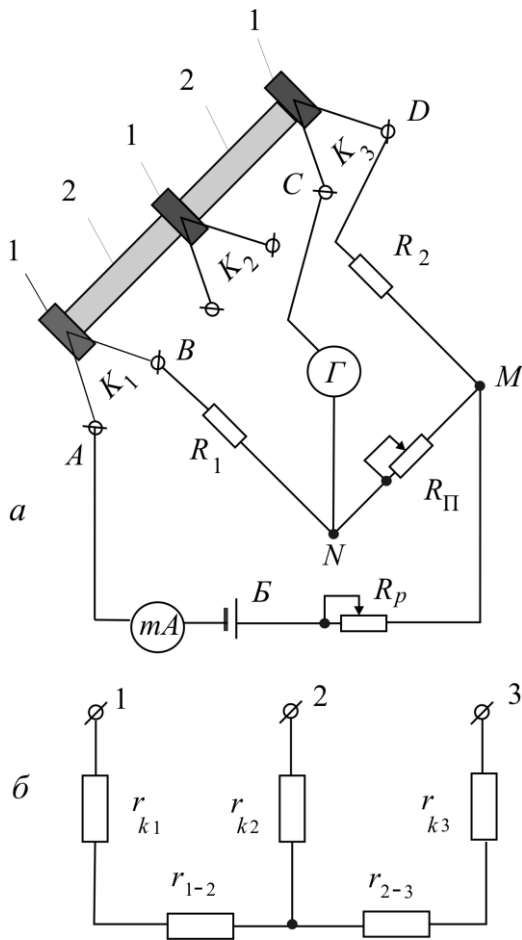


Рис. 1. Схема вимірювання перехідного опору тонкоплівкових контактів (а): 1 – контактна смужка; 2 – резистивна плівка; еквівалентна схема тонкоплівкового резистора (б)

Еквівалентна схема резистора з трьома контактними смужками наведена на рис. 1, б, де r_{k1} , r_{k2} і r_{k3} – перехідні опори відповідно першої, другої і третьої контактних смужок; а r_{1-2} і r_{2-3} – опори

резистивної плівки між смужками. Почергово вимірюють опори між контактними смужками 1–2, 2–3 і 1–3 ($R_x = R_{1-2}, R_{2-3}, R_{1-3}$). Ці опори складаються з таких частин:

$$\left. \begin{aligned} R_{1-2} &= r_{k1} + r_{1-2} + r_{k2} \\ R_{2-3} &= r_{k2} + r_{2-3} + r_{k3} \\ R_{1-3} &= r_{k1} + r_{1-2} + r_{2-3} + r_{k3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

З системи рівнянь (1) отримуємо

$$r_{k2} = \frac{R_{1-2} + R_{2-3} - R_{1-3}}{2} \quad (2)$$

Опори R_x визначаємо зі співвідношення

$$R_x = \frac{R_{K_3M} \cdot R_{K_1N}}{R_n} \quad (3)$$

Оскільки в опори плечей R_{K_3M} і R_{K_1N} входять опори мікродротяних струмовиводів R_{K_3D} і R_{K_1B} , точно виміряти які важко, то для знаходження дійсних значень R_{K_3M} і R_{K_1N} необхідно виконати таке.

Змінивши магазином R_2 опір плеча K_3M на відому величину ΔR_2 , зрівноважують міст за допомогою плеча порівняння R_n . Новому стану рівноваги відповідає опір R'_n . У такому разі рівновага схеми визначається виразом

$$R_x = \frac{(R_{K_3M} + \Delta R_2) \cdot R_{K_1N}}{R'_n} \quad (4)$$

Із співвідношень (3) і (4) отримуємо

$$R_{K_3M} = \frac{R_n \cdot \Delta R_2}{R'_n - R_n} \quad (5)$$

Аналогічно знаходимо дійсне значення опору плеча K_1N і потім за (3) визначаємо шукане значення R_x . Помноживши значення контактного опору, розрахованого за (2), на площу контакту S_k , отримаємо питомий перехідний контактний опір

$$\rho_k = r_k \cdot S_k, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 \quad (6)$$

Для плівок Al-МЛТ-3М вказаних товщин значення ρ_k становлять від 0,31 до 1,54 Ом·см². Очевидно, різниця значень ρ_k для різних тонкоплівкових контактів визначається переважно локальними структурними дефектами плівок, що контактують, і якістю адгезії контактних смужок.

За допомогою додаткових досліджень було встановлено, що перехідним опором плівка Al – струмовивід Au можна знехтувати порівняно з опором переходу резистивна плівка – смужка Al .

2.2. Потенціометричний метод вимірювання опорів контактів на тонких плівках. Описаний вище мостовий метод вимірювання перехідних контактних опорів має недолік, пов'язаний з тривалим вимірювальним процесом. Під час кожного вимірювання для урахування опору дротяних струмовиводів доводиться виконувати додаткові зрівноважування мостової схеми. Крім того, ця методика пов'язана з великим обсягом обчислень.

Нижче розглядається метод вимірювання контактних опорів за допомогою потенціометра. Метод ґрунтується на послідовному вимірюванні опорів ділянок зразка між трьома контактними смужками. Застосування з цією метою потенціометра значно скорочує тривалість вимірювання.

На рис. 2 наведена вимірювальна схема для визначення перехідних опорів між контактними смужками 1 і тонкою плівкою 2. Послідовність вимірювання така.

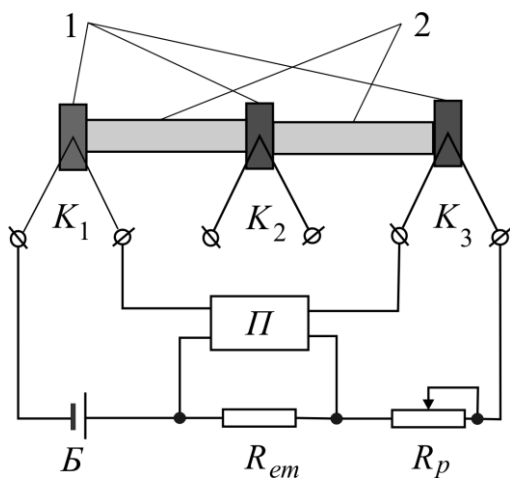


Рис. 2. Схема для вимірювання перехідних контактних опорів: 1 – контактна смужка; 2 – резистивна плівка

Спочатку за допомогою потенціометра Π вимірюємо падіння напруги $U_{K_1K_3}$ між контактами $K_1 - K_3$, як показано на рис.2. Потім перемикаємо струмовий і потенціальний провідники з контакту K_3 на контакт K_2 і вимірюємо падіння напруги $U_{K_1K_2}$ і, нарешті, перемкнувши струмовий і потенціальний

провідники з контакту K_1 на контакт K_3 , вимірюємо падіння напруги $U_{K_2K_3}$. Значення сили струму в колі (I_1, I_2, I_3) щоразу контролюємо за падінням напруги на еталонному опорі R_{em} , яким слугувала взірцева котушка типу Р-321 номіналом 10 Ом. Вимірні опори містять такі складові частини:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_{K_1K_3}}{I_1} &= r_{k1} + r_{1-2} + r_{2-3} + r_{k3} \\ \frac{U_{K_1K_2}}{I_2} &= r_{k1} + r_{1-2} + r_{k2} \\ \frac{U_{K_2K_3}}{I_3} &= r_{k2} + r_{2-3} + r_{k3} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де r_{k1}, r_{k2}, r_{k3} – перехідні опори трьох контактів; r_{1-2} і r_{2-3} – опори ділянок тонкої плівки між контактними смужками (див. рис. 1, б). З (7) знаходимо

$$r_{k2} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{K_1K_2}}{I_2} + \frac{U_{K_2K_3}}{I_3} - \frac{U_{K_1K_3}}{I_1} \right). \quad (8)$$

Цю методику застосовували для визначення перехідних опорів між тонкою плівкою з алюмінію завтовшки 1400Å і контактними смужками з міді завтовшки 2500Å .

Вимірні значення ПКО між мідною і алюмінієвою плівками лежать в інтервалі від $9,9 \cdot 10^{-4}$ до $7,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Для перевірки омичності контактів вимірювання виконували для двох протилежних напрямків робочого струму, який становив 2 мА. Встановлено, що всі досліджені контакти є омичними.

Питомий опір переходу дротина Au – плівка Cu дорівнює $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, тобто він майже на три порядки менший від величини ρ_k переходу плівка Al – плівка Cu .

Під час оцінювання похибки вимірювання було розглянуто внесок в її значення від шунтувального впливу вимірюваної контактної смужки на ділянку алюмінієвої плівки, що перебуває під нею. Для цього за допомогою потенціометра виміряли опори ділянок резистора r_{k1k2}, r_{k2k3} і r_{k1k3} , використовуючи смужки K_1 і K_3 як струмовивідні. Легко відзначити, що

$$\left. \begin{aligned} r_{k1k2} &= r_{k1} + r_{1-2} \\ r_{k2k3} &= r_{2-3} + r_{k3} \\ r_{k1k3} &= r_{k1} + r_{1-2} + r_{2-3} + r_{k3} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Виявилось, що сума опорів r_{k1k2} і r_{k2k3} , як правило, дещо відрізняється від значення r_{k1k3} , що вносить похибку у визначення контактної опору за допомогою (8).

Значення цієї похибки залежить від співвідношення між розміром контактної смужки a , тобто її протяжністю вздовж резистора, і довжиною резистора b (віддалю між контактними смужками K_1 і K_3). Наприклад, для резисторів, у яких $\frac{a}{b} = 0,11$, похибка вимірювання контактної опору, зумовлена шунтувальною дією вимірюваної контактної смужки, становить 0,9%, а для резисторів з $\frac{a}{b} = 0,25$ вона зростає до 1,6%. Якщо $\frac{a}{b} = 0,33$, контактний опір, розрахований за (8), приблизно на 5% відрізняється від дійсного його значення.

Частка, яку вносить вимірювальна апаратура у похибку вимірювань, є незначною і не перевищує 0,1%.

2.3. Вимірювання вольт-амперних характеристик перехідних контактних опорів. Відомий метод вимірювання вольт-амперних характеристик контактів, нанесених на масивні зразки напівпровідника [6]. Однак цей метод є неточним, оскільки вимірювана напруга перевищує дійсне значення падіння напруги на контактному опорі. Запропонований нами метод дає змогу підвищити точність вимірювання ВАХ перехідних контактних опорів. Вимірювання виконували на тонкоплівкових зразках. Схема вимірювальної установки наведена на рис.3. Спад напруги на контактному переході r_{k2} (див. рис.1, б) визначаємо як різницю між двома величинами, одна з яких дорівнює спаду напруги на опорах r_{k1}, r_{1-2}, r_{k2} ; друга – спаду напруги на опорах r_{k1}, r_{1-2} . Для виключення похибки, пов'язаної з можливою залежністю опорів r_{k1}, r_{1-2}, r_{k2} від значення сили струму, робочий струм через зразок увесь час підтримували на одному рівні.

З'єднавши контакти M і N (рис. 3), пропускаємо струм від батареї B через резистивну плівку R і вимірюємо з допомогою потенціометра Π спад напруги на ділянці плівки між контактними смужками K_1 і K_2

$$U_{K_1K_2} = I(r_{k1} + r_{1-2}). \quad (10)$$

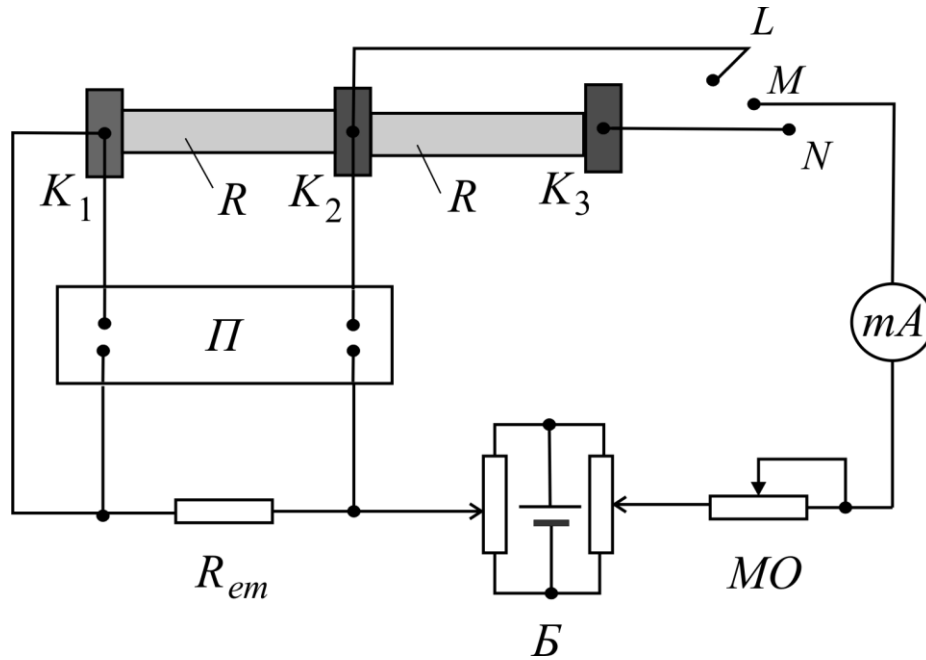


Рис. 3. Схема для вимірювання вольт-амперних характеристик контактів

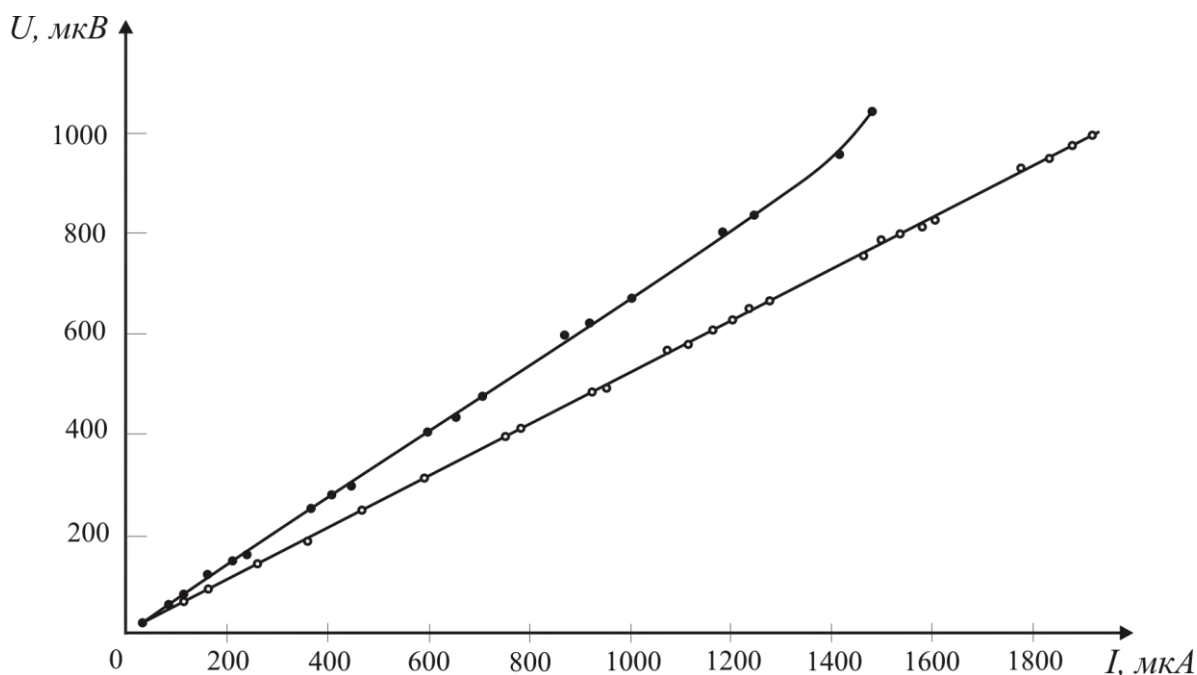


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики контактів між алюмінієвою і мідною плівками

Силу робочого струму контролюємо грубо за міліамперметром і точно – за падінням напруги на еталонній котушці опору R_{em} . Перекинувши контакт L в положення M (попередньо розімкнувши контакти M і N), за допомогою магазину опорів МО встановлюємо в колі попереднє значення сили струму I і потім вимірюємо спад напруги

$$U'_{K_1K_2} = I(r_{k1} + r_{1-2} + r_{k2}). \quad (11)$$

Спад напруги на контакті отримуємо як різницю між виразом (11) та (10)

$$I \cdot r_{k2} = U'_{K_1K_2} - U_{K_1K_2}. \quad (12)$$

Описаний метод використовували для вимірювання ВАХ перехідних контактних опорів між резистивною плівкою з Al завтовшки 400Å і напиленими смужками з Cu завтовшки 550Å . Результати вимірювань для двох контактів наведені на рис.4. Лінійність обох ВАХ свідчить, що ці контакти є омичними. Метод придатний для вимірювання ВАХ як омичних, так і неомичних контактів.

3. Висновки

1. Мостовий метод вимірювання перехідних контактних опорів має високу точність; відносна похибка не перевищує 0,35%. Недоліками мостового методу є

тривалий вимірювальний процес і значний обсяг розрахунків.

2. Потенціометричний метод вимірювань потребує менших затрат часу, ніж мостовий. Реальна похибка вимірювань контактних опорів потенціометричним методом може становити не більше ніж 0,9 %. Цей метод рекомендується для вимірювання контактних опорів, які становлять не менше ніж 0,25 % від загального опору тонкоплівкового зразка.

3. Запропонований потенціометричний метод вимірювання ВАХ перехідних контактних опорів придатний для дослідження як омичних, так і неомичних контактів.

1. Лях-Кагуй Н.С. Низькотемпературні характеристики ниткоподібних кристалів $Si_{1-x}Ge_x$ і їх застосування для створення елементної бази сенсорів температури та деформації. Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.27.01/Нац. ун-т "Львів. політехн.", – Львів, 2004, –20 с. 2. Стахіра П.Й. Фізико-технологічні засади мікроелектронних сенсорів на основі гетероструктур органічних та неорганічних напівпровідників. Автореф. дис... доктора техн. наук: 05.27.06/ Нац. ун-т "Львів. політехн.", – Львів, 2005, –30 с. 3. Датчик для вимірювання температури і магнітного поля/С.С.Варшава, Е.Ф.Венгер, А.В.Прохорович, С.І.Юциук. Патент України на винахід №33148А. 2001. Бюл.№1. 4. Дубинко С.В. Датчики магнітного поля на основі епітаксціальних плінок феррит-гранатов//Ученые записки Симферопольского гос. ун-та. – Симферополь, 1997. –

№4(43). –С.30–40. 5. *Jakubowska M., Pitt K. Influence of contacts and firing process on properties of thick film resistors on alumina and dielectrics// Journ. Mater. Science: Materials in Electronics. – 1995. –№6. –Р.75–78.* 6. *Андерсон В., Мартинес Д., Мэджид А.Г. Электрические характеристики контактов из золота и аквадага, нанесенные на поверхность*

монокристаллов закиси никеля// Приборы для научных исследований. –1970. –№12. – С.28–30. 7. *Варшава С.С., Лях Н.С., Стасюк Н.М. Нелінійні ефекти в точкових контактах метал–кремній, метал–кремній–германій// Фізика і хімія твердого тіла. –2001. –т.2, №4. –С.727–734.*