



**MATERIAŁY
X MIĘDZYNARODOWEJ
NAUKOWI-PRAKTYCZNEJ
KONFERENCJI**

**STRATEGICZNE PYTANIA
ŚWIATOWEJ NAUKI - 2014**

07 - 15 lutego 2014 roku

Volume 35

Techniczne nauki

Przemysł
Nauka i studia
2014

Д.т.н., проф. Осадчук О.В., Нікешин Ю.І.
Вінницький національний технічний університет

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ОПОРУ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

На сьогоднішній день існує велика потреба в застосуванні вимірювання питомого опору на напівпровідникових зразках (виготовлення мікропроцесорів, мікроконтролерів, схем пам'яті та ін.). Існує багато засобів, методів та приладів для вимірювання напівпровідникового опору. Багато методів вимірювання питомого електричного опору матеріалів засновані на вимірюванні різних електричних потенціалів на деяких зразках, через які проходить електричний струм. Ми розглянемо найбільш актуальні на теперішній момент можливості вимірювання питомого опору на напівпровідникових зразках.

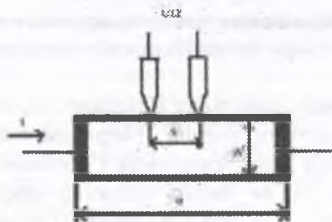


Рис. 1. Схематичне зображення двозондового методу вимірювання питомого опору на напівпровідникових зразках [1]

Одним із найперших методів був двозондовий метод (рис. 1), в якому знайшов використання для вимірювання опору металів. Двозондовий метод використовують для вимірювання питомого опору зразків, які мають правильну геометричну форму і постійний поперечний переріз. Але від не давав тої точності яка була необхідна. Тоді для швидкого вимірювання опору почали використовувати чотиризондовий метод, метод опору точкового контакту, а також метод Вандер-Пау. Перелічені методи дозволяють виконувати вимірювання не тільки на однорідних зразках, а й на дифузійних, епітаксціальних та іонно-легованих шарах. Для зондових методів силові лінії напруженості електричного поля непаралельні по розрізу площини, через що спочатку необхідно теоретично розрахувати розподіл питомого опору та вимірювальні величини – струм та напрута. При використанні зондових методів потрібен якісний контакт з напівпровідниковими зразками.

Найбільш використовуваний метод – це чотиризондовий (рис. 2) [1]. Крім високих метрологічних показників вибір чотиризондового методу проявляється тому що для його застосування не потрібно створювати омичні контакти для вимірювання, можливе вимірювання питомого опору великих зразків самих різних форм та розмірів, а також питомого опору шарів напівпровідникового опору.

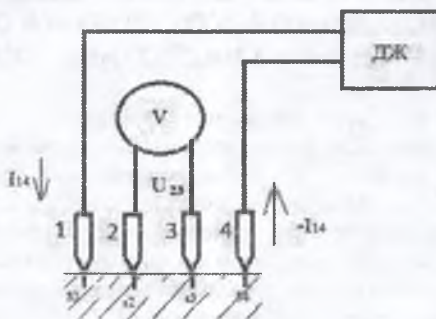


Рис. 2. Схематичне зображення чотиризондового методу вимірювання питомого опору на напівпровідникових зразках

Для використання необхідна рівна поверхня, лінійні розміри якої перевищують лінійні розміри системи зондів. Джерелом похибки може бути фотопровідність яка виникає під дією освітлення і особливо сильно проявляється в зразках з високим опором. Так як напівпровідники мають відносно високий температурний коефіцієнт опору, то при вимірюванні за рахунок протікання через зразок струму може виникнути не тільки локальний нагрів, а також підняття температури всього зразку. Для зменшення впливу інжекції та отримання контакту металевих зондів опору поверхні зразку, на якій проводять вимірювання, металеві зонди обробляються. Однак подібна обробка, особливо для високоомних зразків іноді недостатня. Треба відмітити, що високий контактний опір між зондами та площадками є однією з основних причин який обмежує використання чотиризондового методу для вимірювання напівпровідникового опору. Чотиризондовий метод використовують для вимірювання напівпровідникового опору тонких шарів на підкладках, що відрізняються від шару значенням напівпровідникового опору чи видом електропровідності. Зазвичай проводиться вимірювання не тільки поверхневого опору, характерного шарам в цілому, а також розподіл питомого опору по товщині шару, які безпосередньо зв'язані з характером розподілу легуючих домішок.

Метод опору розтікання точкового контакту заснований на вимірюванні питомого опору структури, що складається з напівпровідникового зразка та металевого

зонда, встановленого на його плоскій поверхні. Якщо металевий зонд має з поверхнею напівпровідника омичний контакт малої площі, то опір структури, вимірюваний при пропусканні струму через цей контакт, називають опором розтікання. Передбачається що другий контакт до напівпровідника представляє собою контакт великої площини з надто малим опором, який розташований на великій відстані від металевого зонда. Цей метод отримав широке використання для вимірювання питомого опору різних напівпровідникових матеріалів в широкому діапазоні вимірювальних значень при дуже великій локальності вимірів, для контролю епітаксійних структур, а також для визначення розподілу питомого опору по товщині дифузійних та іонно-легованих шарів.

Складові похибки вимірювання зумовлені не відтворюваністю розмірів контакту зонду-напівпровідника, впливом опору контакту за рахунок присутності оксидного шару, нагрівом в приконтактній області та зниження рухливості носіїв заряду в сильних електричних полях.

Метод Ван-дер-Пау полягає в тому що, питомий опір зразків правильної геометричної форми можна розрахувати вводячи поправочні функції, враховуючи геометричну форму та відношення розмірів зразку. В загальному випадку для пластини довільної геометричної форми розрахунок питомого опору можливий при використанні видозміненого чотиризондового методу.

На основі розглянутого методу розроблені автоматичні пристрої для поділення пластин на групи по значенню питомого опору.

Двохкомбінаційний чотиризондовий метод. Даний метод представляє собою різновид чотиризондового методу при лінійному розташуванні системи сквідистантних зондів, але в порівнянні від нього виміри проводять двічі при різних комбінаціях струмових та потенціальних зондів. При відстані $5s$ та більше від краю пластини, похибка розрахунку доверхнього опору не перевищує $0,1\%$.

Завдяки високій точності та спрощеній процедурі вимірювання двохкомбінаційного чотиризондового методу використовують для вивчення розподілу поверхневого опору іонно-легованих шарів по площі пластини. На основі цього методу створені автоматизовані вимірювальні пристрої з кроковим переміщенням зондової головки на поверхні зразка.

Високочастотні безконтактні методи виміру. Описані раніше методи вимірювання питомого опору ϵ , по суті, руйнуючими. Це зумовлено тим, що всі вони використовують безпосередній електричний контакт з зразком.

Важливим напрямком при розробці безконтактних методів контролю є використання струмів високої частоти (ВЧ). Зв'язок між зразками та вимірювальною схемою при використанні струмів ВЧ бувають індуктивним або ємнісним.

Індуктивний метод. Для вимірювання питомого опору індуктивним методом застосовують котушку індуктивності, по якій пропускають змінний струм, а також записуючий прилад який дозволяє визначити значення і фази цього струму. При вимірюваннях в залежності від типу котушки (датчика) досліджувані зразок розташовують в середині котушки, чи котушку прижимають до поверхні досліджуваного зразка. В двох випадках здійснюється індуктивний зв'язок зразка з котушкою. Досліджуваний зразок впливає на електричні параметри

катушки індуктивності, в результаті чого струм який проходить через неї несе інформацію про властивості напівпровідникового зразка. Конструкція катушки (датчика) залежить від форми та вимірюваних параметрів зразка.

Для контролю параметрів монокристалів, які мають форму стержня круглого перетину, використовують прохідні катушки. Великою універсальністю володіють накладні катушки, які розташовують на поверхні вимірюваного зразка. Їх виготовляють невеликого діаметра з застосуванням магнітопроводів та спеціальних екранів, які локалізують магнітне поле датчика.

Схема пристрою для вимірювання питомого електричного опору напівпровідників аналогічні схемам для неруйнівного контролю якості металів з використанням вихрових струмів. Однак зміни параметрів напівпровідників на відміну від металів існують при більш високих частотах, що обумовлено значно меншою їх питомою провідністю.

Ємнісний метод. Згідно цього методу, зв'язок зразка з вимірювальною схемою здійснюється за допомогою плоских, U-подібних чи кільцевих металевих контактів, відокремлених від зразка шаром діелектрика.

Використання перетворювачів з частотним вихідним сигналом дозволяє отримати ряд переваг у порівнянні з аналоговими, які містяться у значному підвищенні завадостійкості, що дозволяє підвищити точність вимірювання, а також у можливості отримання значних вихідних сигналів. Це дозволяє відмовитись від підсилювальних пристроїв та аналого-цифрових перетворювачів в наступній обробці сигналів, що підвищує ефективність вимірювальної апаратури [2, 3].

Електрична схема мікроелектронного шестизондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом подана на рис. 3.

Вона являє собою гібридну інтегральну схему, яка складається з біполярного (10) та польового (9) транзисторів [4]. Ця схема утворює автогенераторний пристрій, частота генерації якого залежить від зміни потенціалів на вимірювальному напівпровідниковому зразку.

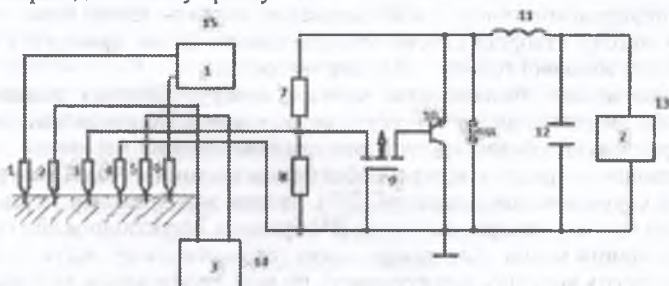


Рис.3. Мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом

Мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом, в якому за рахунок введення нових елементів та зв'язків досягається можливість без перекалібрування проводити вимірювання у широкому діапазоні з високою точністю завдяки введенню шести зондів.

Розглянемо мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з активним індуктивним елементом, що дозволяє його виконати повністю в інтегральному вигляді. Електрична схема мікроелектронного чотиризондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом подана на рис. 4 [5]. Вона являє собою гібридну інтегральну схему, яка складається з біполярного (9) та польового (10) транзисторів і біполярного транзистора (12) разом з RC-колом, який реалізує активний індуктивний елемент. Ця схема утворює автогенераторний пристрій, частота генерації якого залежить від зміни потенціалів на вимірювальному напівпровідниковому зразку. На електродах колектора біполярного і стоку польового транзисторів існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – емісійний характер. Підключення активного індуктивного елемента на основі біполярного транзистора (12) і RC-кола до колектора біполярного транзистора (9) і загальної шини через блокуючу ємність (14) створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором [3].

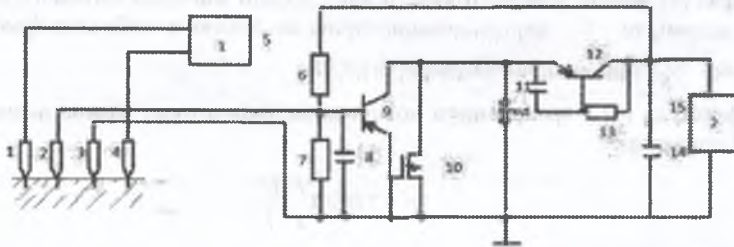


Рис. 4. Мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом

Резистори (6, 7) разом з джерелом постійної напруги (2) забезпечують режим живлення схеми пристрою. При зміні потенціалу на електродах (2, 3) відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру автогенератора, що викликає зміну його резонансної частоти.

Для отримання залежності частоти генерації від зміни потенціалу на електродах (2, 3) необхідно визначити основні математичні залежності. Так різниця потенціалів [1]:

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I_{10} \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right) \quad (1)$$

Згідно (1) питомий опір напівпровідникового зразка:

$$\rho = \frac{2\pi U_{21}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2 + S_3} + \frac{1}{S_1 - S_2} + \frac{1}{S_3} I_{14}} \quad (2)$$

Якщо відстань між зондами однакова $S_1 = S_2 = S_3 = S_4$ тоді:

$$\rho = 2\pi S \frac{U_{21}}{I_{14}} \quad (3)$$

Використовуючи інші комбінації включення струмових та потенціальних зондів, можна отримати аналітичні вирази для питомого опору, які відрізняються від (2) значенням числових коефіцієнтів.

Різниця у відстанях між зондами веде до збільшення похибки вимірювання ρ . Якщо, наприклад, кожний із зондів зсунутий відносно свого номінального положення на x_i , то відносна похибка [1]:

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{1}{4S} (3x_1 - 5x_2 + 5x_3 - 3x_4) \quad (4)$$

Вираз (4) можна використовувати для корекції значення питомого опору, якщо x_i відомі, то S – середньоквадратична випадкова похибка вимірювання $\frac{\delta\rho}{\rho} = 2.06(2 \frac{S}{S})$ при довірчій ймовірності 0,95.

З формули (3) з врахуванням чотирьох витоків струму можна визначити питомий опір зразка:

$$\rho = 2\pi S f_1 \left(\frac{l}{s}\right) \frac{U}{I} \quad (5)$$

$$f_1\left(\frac{l}{s}\right) = \left[1 + \frac{1}{2+2\left(\frac{l}{s}\right)} - \frac{1}{5+2\left(\frac{l}{s}\right)} - \frac{1}{1+2\left(\frac{l}{s}\right)} + \frac{1}{4+2\left(\frac{l}{s}\right)} \right]^{-1} \quad (6)$$

де,

Поправочна функція, яка залежить від значення $\frac{l}{s}$. При $l=0$, $f = \left(\frac{l}{s}\right) \approx 2$
 $l \geq 3S$ функція $f = \left(\frac{l}{s}\right) \approx 2$. Через зонди 1 та 4 (протікає струм)

$$f_2\left(\frac{l}{s}\right) = \left[1 + \frac{1}{1+2\frac{l}{s}} - \frac{1}{2+2\frac{l}{s}} - \frac{1}{4+2\frac{l}{s}} - \frac{1}{5+2\frac{l}{s}} \right]^{-1}; \quad (7)$$

$$f_3(I/S) = \left\{ 1 + \frac{2}{\left[1 + \left(2I/S\right)^2\right]^{1/2}} - \frac{1}{\left[1 + \left(2I/S\right)^2\right]^{1/2}} \right\}; \quad (8)$$

$$f_4(I/S) = \left\{ 1 - \frac{2}{\left[1 + \left(2I/S\right)^2\right]^{1/2}} - \frac{1}{\left[1 + \left(2I/S\right)^2\right]^{1/2}} \right\}^{-1} \quad (9)$$

Значення потенціалів на вимірвальних зондах 2 та 3 можна визначити шляхом додавання потенціалів, створених в даній точці кожним витком струму:

$$U_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \left\{ \left[S^2 + (2\omega n)^2 \right]^{-1/2} - \left[(2S)^2 + (2\omega n)^2 \right]^{-1/2} \right\}; \quad (10)$$

$$U_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \left\{ \left[(2S)^2 + (2\omega n)^2 \right]^{-1/2} - \left[S^2 + (2\omega n)^2 \right]^{-1/2} \right\}; \quad (11)$$

$$\rho = 2\pi S g_1 \left(\frac{\omega}{S} \right) \left(\frac{U}{I} \right); \quad (12)$$

$$g_1 \left(\frac{\omega}{S} \right) = \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left[\left(1 + U_n \frac{\omega^2}{S^2} \right)^{-1/2} - \left(4 + 4n^2 \frac{\omega^2}{S^2} \right)^{-1/2} \right] \right\}^{-1}; \quad (13)$$

$$g_2 \left(\frac{\omega}{S} \right) = \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 + 4n^2 \frac{\omega^2}{S^2} \right)^{-1/2} - \left(4 + 4n^2 \frac{\omega^2}{S^2} \right)^{-1/2} \right] \right\}^{-1}. \quad (14)$$

На основі нелінійної еквівалентної схеми та виразів (1 – 14) у відповідності із методом рівноваги Ляпунова визначена функція перетворення, яка описує залежність частоти генерації від зміни потенціалів які залежать від питомого опору напівпровідникового зразка. Аналітичний вираз функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4LC_{GD}(C_B(U_2, U_3, g_1, g_2)R_B(U_2, U_3, g_1, g_2))^2}}{2LC_{GD}(R_B(U_2, U_3, g_1, g_2)C_B(U_2, U_3, g_1, g_2))^2}} \quad (15)$$

де

$$A_1 = LC_{GD} - (C_B(U_2, U_3, g_1, g_2)R_B(U_2, U_3, g_1, g_2))^2 - C_{GD}C_B(U_2, U_3, g_1, g_2)R_B^2(U_2, U_3, g_1, g_2),$$

Згідно (1) питомий опір напівпровідникового зразка:

$$\rho = \frac{2\pi U_{23}}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2 + S_3} + \frac{1}{S_4 - S_2} + \frac{1}{S_4}} I_{14} \quad (2)$$

Якщо відстань між зондами однакова $S_1 = S_2 = S_3 = S_4$ тоді:

$$\rho = 2\pi S \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (3)$$

Використовуючи інші комбінації включення струмових та потенціальних електродів, можна отримати аналітичні вирази для питомого опору, які відрізняються від (2) значенням числових коефіцієнтів.

Різниця у відстанях між зондами веде до збільшення похибки вимірювання. Якщо, наприклад, кожний із зондів зсунутий відносно свого номінального положення на x_i , то відносна похибка [1]:

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{1}{4S} (3x_1 - 5x_2 + 5x_3 - 3x_4) \quad (4)$$

Вираз (4) можна використовувати для корекції значення питомого опору, якщо x_i відомі, то S – середньоквадратична випадкова похибка вимірювання $\frac{\delta\rho}{\rho} = 2.06(2 \frac{S}{S})$ при довірчій ймовірності 0,95.

З формули (3) з врахуванням чотирьох витоків струму можна визначити питомий опір зразка:

$$\rho = 2\pi S f_1\left(\frac{l}{S}\right) \frac{U}{I} \quad (5)$$

де,
$$f_1\left(\frac{l}{S}\right) = \left[1 + \frac{1}{2+2\left(\frac{l}{S}\right)} - \frac{1}{5+2\left(\frac{l}{S}\right)} - \frac{1}{1+2\left(\frac{l}{S}\right)} + \frac{1}{4+2\left(\frac{l}{S}\right)} \right]^{-1} \quad (6)$$

Поправочна функція, яка залежить від значення $\frac{l}{S}$. При $l=0$, $f = \left(\frac{l}{S}\right) \approx 2$.
З функція $f = \left(\frac{l}{S}\right) \approx 2$. Через зонди 1 та 4 (протікає струм)

$$f_2\left(\frac{l}{S}\right) = \left[1 + \frac{1}{1+2\frac{l}{S}} - \frac{1}{2+2\frac{l}{S}} - \frac{1}{4+2\frac{l}{S}} - \frac{1}{5+2\frac{l}{S}} \right]^{-1} \quad (7)$$

L – індуктивність активного індуктивного елемента, C_B, R_B – еквівалентна ємність й опір базової області магніточутливого транзистора, C_{GD} – ємність затвор-стік польового транзистора.

Чутливість мікроелектронного чотиризондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з активним індуктивним елементом визначається на основі виразу (15) і описується рівнянням

$$S_B^{f_0} = -0.0198 \left(-2C_B(B)R_B^3(B)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} - 2C_B^2(B)R_B^2(B) \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) - 2C_B^2(B) \times \right. \\ \times R_B^2(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) - 3C_B(B)R_B^2(B)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) - 2C_{GD}C_B^2(B)R_B^2(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) + 8C_B^2(B)R_B^2(B)L \times \\ \times C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) + 8LC_{GD}C_B^2(B)R_B^2(B) \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) + 4LC_{GD}R_B(B) \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4R_B(B) \times \\ \times \left(\frac{\partial C_B(B)}{\partial B} \right) LC_{GD} + 4C_B(B)LC_{GD} \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4LC_{GD}C_B(B) \times \\ \left. \times \left(\frac{\partial R_B(B)}{\partial B} \right) \right) / \left(\left(2\sqrt{A_1 + \sqrt{A_1 + 2A_2}} / A_2 \right) LC_{GD}C_B^1(B)R_B^3(B)\sqrt{A_1 + 2A_2} \right), \quad (16)$$

$$\text{де } B = f(U_2, U_3, g_1, g_2); \quad A_2 = 2LC_{GD}(C_B(B)R_B(B))^2.$$

Висновки

В роботі показана можливість вимірювання питомого опору на напівпровідникових зразках різних розмірів та матеріалів завдяки різним методам та засобам на основі перетворювачів з частотним виходом. Отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Показана можливість покращення чутливості та збільшення точності вимірювання напівпровідникового опору.

Література

1. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. –М. : Высшая школа, 1987. – 239 с.
2. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук –Вінниця : «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
3. Осадчук В.С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. –Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1999. – 275 с.
4. Патент №74631 України, МПК H01 L 21/66. Мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору /Осадчук О.В., Нікешин Ю.І. Вінницький національний технічний університет. Опубл.12.11.12 Бюл.21.
5. Патент №76387 України, МПК H01 L 21/66, G01R 31/26. Мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору /Осадчук О.В., Нікешин Ю.І. Вінницький національний технічний університет. Заявка № u201203166; Заяв. 19.03.2012; Опубл.10.01.13 Бюл.1.