

<sup>1</sup> студентка 5 курсу фізико-математичного факультету, ДДПУ

<sup>2</sup> доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри фізики, ДДПУ

<sup>3</sup> кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри вищої математики і фізики,  
Керченський державний морський технологічний університет

e-mail: alyonasergeevna@bk.ru

## ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКА ЧОТИРЬОХЗОНДОВИМ МЕТОДОМ

У статті розглянута методика вимірювань і обчислювання питомого опору напівпровідників, для яких можна забезпечити контакти з поверхнею без інжекції носіїв заряду в об'єм. Наведені формули для обчислення опору об'ємних кристалів і тонких пластин, які використовуються для інтегральних схем.

**Ключові слова:** *питомий опір, зонди, потенціал, напівпровідник.*

### Вступ

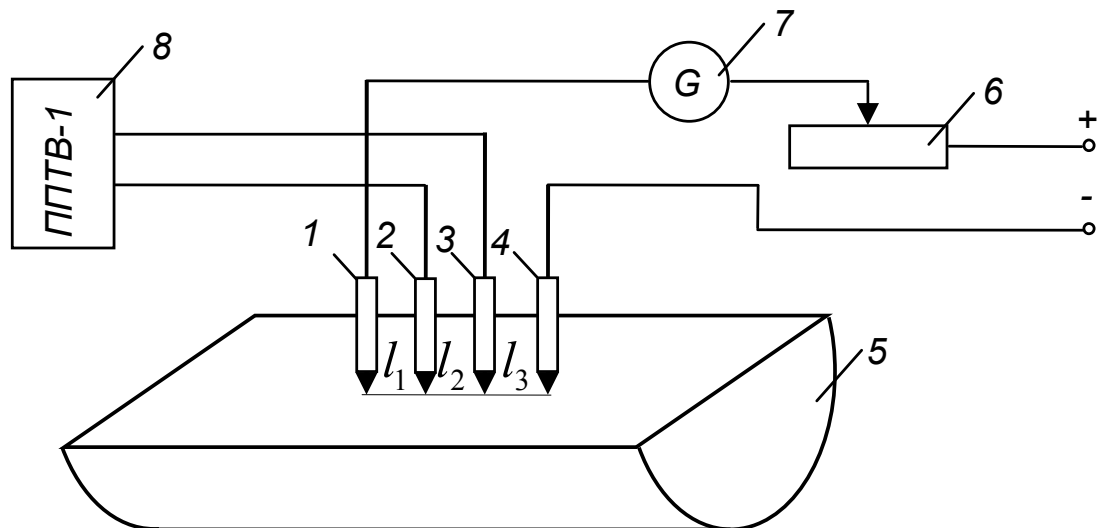
Чотирьохзондовий метод вимірювання питомого опору напівпровідників є найпоширенішим. Крім високих метрологічних показників перевага чотирьохзондового методу полягає в тому, що для його застосування не потрібно створення омичних контактів до зразка, можливе вимірювання питомого опору об'ємних кристалів найрізноманітнішої форми і розмірів, а також питомого опору шарів напівпровідникових структур. Умовою для його застосування з точки зору форми зразка є наявність плоскої поверхні, лінійні розміри якої перевершують лінійні розміри системи зондів.

### Основна частина

Розглянемо теоретичні основи чотирьохзондового методу вимірювання питомого опору стосовно до зразка, який являє собою напівнескінченний об'єм, обмежений плоскою поверхнею.

На плоскій поверхні зразка вздовж прямої лінії розміщені чотири металевих зонди (рис.1) з малою площею вістря, відстані між якими  $l_1, l_2, l_3$ . Через два зовнішніх зонди 1 і 4 пропускають електричний струм  $I_{14}$ , на двох внутрішніх зондах 2 і 3 вимірюють різницю потенціалів  $U_{23}$ .

За виміряними значеннями різниці потенціалів між зондами 2 і 3 та струму, що протікає через зонди 1 і 4, можна визначити питомий опір зразка.



**Рис. 1:** Схема вимірювання питомого опору напівпровідникових матеріалів чотирьохзондовим методом;  
1,2,3,4 – зонди, 5 – зразок напівпровідника, 6 – реостат, 7 – гальванометр,  
8 – потенціометр

Щоб знайти аналітичний зв'язок між питомим опором  $\rho$ , струмом  $I_{14}$  і напругою  $U_{23}$ , необхідно спочатку вирішити більш просту задачу, пов'язану з протіканням струму через окремий точковий зонд, що знаходиться в контакті з плоскою поверхнею напівпровідникового зразка напівнескінченного об'єму (рис.1). Так як просторовий розподіл електричного потенціалу  $U(r)$  у зразку має сферичну симетрію, то для його визначення досить розв'язання рівняння Лапласа у сферичній системі координат, в якому залишено лише член, що залежить від  $r$ ,  $\Delta U(r) = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dU}{dr} \right) = 0$  за умови, що потенціал в точці  $r = 0$  позитивний і прагне до нуля при дуже великих  $r$ . Інтегрування цього рівняння з урахуванням зазначених граничних умов дозволяє отримати наступне рішення:  $U(r) = -C/r$ . Константу інтегрування можна обчислити з умови для напруженості електричного поля  $\mathcal{E}$  при деякому значенні  $r = r_0$ :

$$\mathcal{E}(r_0) = - \left. \frac{dU(r)}{dr} \right|_{r=r_0}.$$

Оскільки густина струму, що протікає через півсферу радіусом  $r_0$ ,  $j = \frac{I}{(2\pi r_0^2)}$ , а відповідно до закону Ома  $j = \frac{\mathcal{E}}{\rho}$ , то  $\mathcal{E}(r_0) = \frac{I\rho}{(2\pi r_0^2)}$ . Остаточного отримаємо:

$$U(r) = \frac{I\rho}{(2\pi r)}. \quad (1)$$

Отже маємо, що розподіл потенціалу буде таким же, коли форма контакту зонда з поверхнею зразка має вигляд напівсфери. Нехай радіус контакту дорівнює  $r_1$ . Тоді електрична напруга на зразку дорівнює електричному потенціалу зонда:

$$U(r_1) = \frac{I\rho}{(2\pi r_1)}. \quad (2)$$

З порівняння напруги на приконтактному шарі товщиною  $r_2 - r_1$

$$U(r_1) - U(r_2) = \frac{I\rho}{(2\pi)} \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}$$

і напруги на зразку (2) випливає, що основна зміна потенціалу відбувається поблизу зонда. Наприклад, при  $r_2 = 10r_1$  напруга на зразку перевершує напругу на шарі товщиною  $r_2 - r_1$  всього лише на 10%. Це означає, що значення протікаючого через зонд струму визначається головним чином опором приконтактної області, протяжність якої тим менша, чим менше радіус контакту.

**Лінійне розташування зондів.** Сформулюємо припущення, на яких заснований чотирьохзондовий метод вимірювання питомого опору:

- 1) зонди розташовані на плоскій поверхні однорідного ізотропного зразка напівнескінченного об'єму;
- 2) зонди мають контакти з поверхнею зразка в точках, які розташовані вздовж прямої лінії;
- 3) інжекція носіїв заряду в об'єм зразка відсутня.

За принципом суперпозиції електричний потенціал в будь-якій точці зразка дорівнює сумі потенціалів, створюваних у цій точці струмом кожного зонда. При цьому потенціал має позитивний знак для струму, втікаючого в зразок (зонд 1), і негативний знак для струму, що витікає з зразка (зонд 4). Для системи зондів, відстані між якими  $l_1, l_2, l_3$ , потенціали вимірювальних зондів 2 і 3

$$U_2 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2 + l_3} \right);$$

$$U_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{l_1 + l_2} - \frac{1}{l_3} \right);$$

Різниця потенціалів

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2 + l_3} - \frac{1}{l_1 + l_2} + \frac{1}{l_3} \right). \quad (3)$$

Згідно (3), питомий опір зразка

$$\rho = \frac{2\pi U_{23}}{\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2+l_3} - \frac{1}{l_1+l_2} + \frac{1}{l_3}} \frac{1}{I_{14}}.$$

Якщо відстані між зондами однакові, тобто  $l_1 = l_2 = l_3 = S$ , то

$$\rho = 2\pi S \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (4)$$

Використовуючи інші комбінації включення струмових і потенціальних зондів, можна отримати аналогічні вирази для питомого опору, які відрізняються від (4) значеннями числових коефіцієнтів. При вимірюванні питомого опору тонких напівпровідникових пластин різної товщини необхідно вводити поправку, яка враховує товщину зразка. У цьому разі формула має вигляд:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} d \frac{U}{I} f\left(\frac{d}{S}\right),$$

де  $f\left(\frac{d}{S}\right)$  — поправка на товщину пластин,  $d$  — товщина зразка в мм. Числові значення поправки наведені у таблиці 1

**Таблиця 1. Значення поправки для різних товщин зразка**

$\frac{d}{s}$	0,4	0,5	0,5555	0,625	0,8333	1,0	1,25	1,66	2,0
$f\left(\frac{d}{s}\right)$	0,9995	0,9974	0,9948	0,9898	0,96	0,92	0,849	0,7225	0,6336

Особливістю використання даного експерименту було те, що зразки Ge та Si після вирізання алмазним диском шліфувались мікропорошками АСМ-5, АСМ-1, та хімічно полірувались у водному розчині  $HNO_3$  і  $HF$  в об'ємному співвідношенні 5 : 3 для видалення дефектів після вирізання. Для усунення можливої інжекції носіїв заряду із зондів використовували деформування необхідної поверхні зразка при одночасному ультразвуковому опроміненні. Така дія призводить до створення у приповерхневому шарі товщиною до 10 мкм дефектів структури, що мають високу швидкість поверхневої рекомбінації і запобігають інжекції [8].

## Висновки

У даній роботі студентка навчилася виготовляти вольфрамові зонди для чотирьохзондової голівки, користуватись потенціометром ППТВ-1, виконувати вимірювання струму і різниці потенціалів, розраховувати питомий опір зразків германію та визначати похибки.

На монокристалах кремнія і германія були використані зонди з фосфористої бронзи, алюмінію або вольфрамові зонди із спеціальним покриттям електролітичним способом Ni, Ag, Ga, In. Для усунення інжекції носіїв заряду із зонда в об'єм напівпровідника зразки деформували стисканням при 300 К з одночасним ультразвуковим опроміненням і тим самим вводили дефекти структури на глибину до 10 мкм.

## Література

1. Батавин В.В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Изменение параметров полупроводниковых материалов и структур. — М. : Радио и связь, 1985. — 264 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. — М. : Наука, 1977. — 674 с.
3. Добровольский В. Н., Литовченко В. Г. Перенос электронов и дырок у поверхности полупроводников. — К. : Наук. думка, 1985. — 192 с.
4. Зеегер К. Физика полупроводников. — М. : Мир, 1977. — 615 с.
5. Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю. А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. — М. : Высш. шк., 1969. — 432 с.
6. Смит Р. Полупроводники. — М. : Мир, 1982. — 558 с.
7. Стриха В. И., Ветров А. П. Применение ЭВМ в физическом эксперименте. — К. : Вища шк. Головное изд-во, 1979. — 86 с.
7. Уколов А.И. Измерения времени жизни неосновных носителей заряда в приповерхностном слое монокристаллического Ge зондовым методом / А.И. Уколов, В.А. Надточий, Н.Н. Голоденко // Вісник Харківського національного ун-ту, серія «Фізика». — 2011. — №962, вип. 15. — С. 63–66.

---

**Olhova A.S., Nadtochy V.O., Ukolov O.I**

Donbas State Teachers' Training University, Slavyans'k, Ukraine.

### **Dimension of semiconductor specific resistance by fourth-probes method**

Methodology of dimension and calculation of semiconductor specific resistance for what contacts with surface without discharge's carrier injection in volume are searched in the article. Formulas of resistance calculation of volume crystals and thin plates which used for integral diagrams are cited.

**Keywords:** *specific resistance, probes, potential, semiconductor.*