

УДК 53.08

Вихор Л.М., доктор фіз.-мат. наук ¹
Горський П.В., доктор фіз.-мат. наук ^{1,2}
Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук ^{1,2}

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatysh@gmail.com

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОНТАКТНИХ ОПОРІВ СТРУКТУР «МЕТАЛ – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ» (ЧАСТИНА 1)

Наведено огляд існуючих методів вимірювання електричного контактного опору. Проведено аналіз їх точності, переваг та недоліків, а також можливостей використання у термоелектриці для дослідження та оптимізації структур «метал – термоелектричний матеріал». Бібл. 11, рис. 14.

Ключові слова: електричний контактний опір, вимірювання, точність, термоелектричні перетворювачі енергії.

Вступ

Зменшення собівартості виготовлення термоелектричних перетворювачів енергії є актуальною задачею в термоелектриці. Вирішення цієї задачі дозволить суттєво підвищити конкурентоспроможність як охолоджувальних, так і генераторних термоелектричних модулів та розширити області їх практичного використання.

Зокрема, важливим є використання термоелектрики для рекуперації відходів тепла. Практично всі технологічні процеси у промисловості, а також отримання електричної енергії пов'язані з використанням палив, у тому числі і ядерного, для отримання теплової енергії. Більшість цієї енергії у промисловості після здійснення технологічних процесів розсіюється у оточуюче середовище газовими або рідинними теплоносіями.

У теплових машинах тільки 25 – 40 % теплової енергії перетворюється у механічну. Решта більше 50 % віддається оточуючому середовищу, що призводить до його термального забруднення і порушення теплового балансу Землі. Ця тепла потужність може бути перетворена в електричну енергію. Використання термоелектричних рекуператорів дозволяє отримати з цього тепла стільки електричної енергії, скільки генерують усі атомні електростанції. Таким чином термоелектричні рекуператори можуть стати важливим чинником у загальному екологічному покращенні, і отже є важливими для інтересів загальнолюдської спільноти.

При цьому основною перешкодою для широкого практичного використання термоелектрики для рекуперації теплових відходів є висока вартість термоелектричних перетворювачів енергії, найбільшу частку у якій займає вартість термоелектричного матеріалу. Отже, вартість термоелектричних перетворювачів енергії може бути зменшена у десятки разів і наблизитись до необхідної для широких практичних застосувань завдяки їх мініатюризації. Однак, спроби створити мініатюрні модулі нашо́вхуються на зростаючий вплив контактних

опорів, які зумовлюють катастрофічне зниження якості модулів.

Розробка та оптимізація технологій створення контактних опорів, необхідних для задоволення практичних потреб, здійснюється експериментально шляхом вивчення впливу різноманітних технологічних факторів на величину контактного опору. Останнє є можливим тільки при наявності надійних методів та обладнання для вимірювання контактних опорів.

Метою цієї роботи є аналіз існуючих методів та обладнання для визначення величин контактних опорів та можливостей їх використання для дослідження та оптимізації структур «метал – термоелектричний матеріал».

1. Методи вимірювання електричного контактного опору

1.1 Методи, що застосовуються у мікроелектроніці

До найбільш сучасних методів вимірювання електричного контактного опору належать метод Кокса-Стрека [1], метод лінії передачі, метод Кельвіна та метод зондування межі розділу. Ці методи успішно використовуються в мікроелектроніці [1 – 10].

Автори праці [1] запропонували контакти зі сплаву срібла з індієм та германієм для арсеніду галію *n*-типу і контакти зі сплаву срібла з індієм та цинком для арсеніду галію *p*-типу. В залежності від питомого опору арсеніду галію опір таких контактів складає від 10^{-4} до 10^{-3} Ом·см².

В праці [2] показано, що на контактний опір істотно впливає технологія очищення поверхні напівпровідника. Зокрема, очищення розпиленням замість хімічного травлення істотно знижує контактний опір.

В праці [3] обговорюються різні методи вимірювання контактного опору і розповсюджені джерела похибок. Описано ряд методів, зокрема метод лінії передачі. Представлено і обговорено результати вимірювання контактних опорів для контактів алюміній-кремній в широкому інтервалі рівнів легування поверхневого шару кремнію.

В праці [4] запропоновано метод відокремлення контактного опору від опору масивного зразка. Цей метод ґрунтується на вимірюванні кутової залежності геометричного магнетоопору. Його ефективність перевірено на діодах Ганна. Похибка складає менше 0.5 % від загального опору пристрою.

В праці [5] описано установку для одночасного вимірювання електричного та теплового контактних опорів між металами. Вона дозволяє вимірювати електричний контактний опір з похибкою 0.003 % і тепловий контактний опір з похибкою 4.4 %. Результати вимірювань для реальних контактів знаходяться у добрій згоді з наявними у літературі теоретичними розрахунками.

В праці [6] описано установку для вимірювання електричного контактного опору. З її допомогою можна вимірювати контактні опори порядку 10 мкОм. В ній використовується струм через контакт близько 1 мА, що дозволяє запобігти утворенню електричної дуги.

В праці [7] вказано, що вимірювання контактного опору «метал-високоомний напівпровідник» пов'язано з істотними труднощами, так що помилка може сягати п'яти порядків. Показано, що метод лінії передачі незастосовний, якщо контактний опір менший за 10^{-3} Ом·см².

В праці [8] розроблено установку для вимірювання контактного опору між металевими пластинами в залежності від тиску і досліджено відповідну залежність для пари мідних пластин.

В праці [9] виміряно електричний контактний опір між контактами зі сплаву $Fe-Cr$ та термоелектричним матеріалом $Ca_3Co_4O_9$. Максимальний контактний опір, отриманий при цьому, склав $1.2 \cdot 10^{-7}$ Ом·см².

Суть основних методів вимірювання контактного опору в мікроелектроніці викладена в праці [10]. Методи вимірювання контактного опору поділяються на чотири категорії:

- 1) двоконтактні-двоклемні;
- 2) багатоконтактні-двоклемні,
- 3) чотирьохклемні,
- 4) шести-клемні.

Жоден з цих методів незастосовний до вимірювання питомого поверхневого опору ρ_i . Замість цього визначається питомий контактний опір ρ_c , який не є власне опором поверхні розділу «метал-напівпровідник», але це є практично застосовна чисельна характеристика, яка описує реальний контакт. З цієї точки зору порівняти теорію та експеримент доволі важко, оскільки теорія не може точно передбачити ρ_c , а експериментально важко точно виміряти ρ_i . Часто важко навіть однозначно виміряти ρ_c . Ми обмежимося обговоренням експериментальних методик.

1.1.1 Двоконтактний-двоклемний метод

Цей метод є найбільш раннім. Його точність доволі сумнівна і застосовується він нечасто. Його найпростішу схемну реалізацію показано на рис. 1.

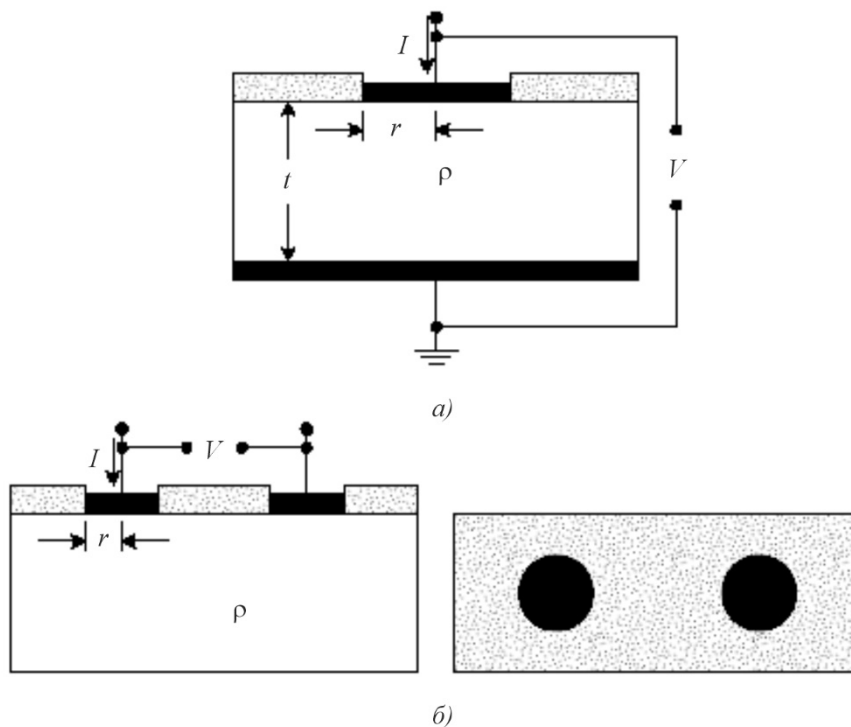


Рис. 1. Вертикальна двоклемна структура (а) і поверхнева двоклемна структура (б) для вимірювання контактного опору [10].

Для однорідного напівпровідника з питомим опором ρ і товщиною t загальний опір $R_t = V/I$, виміряний за схемою (а) при пропусканні через зразок струму I з визначенням напруги V між контактами, дорівнює:

$$R_t = R_c + R_{sb} + R_{cb} + R_p. \quad (1)$$

При вимірюванні за схемою (б) замість (1) використовується співвідношення:

$$R_t = 2R_c + 2R_{sb} + 2R_p. \quad (2)$$

В цих формулах R_c – контактний опір верхнього контакту, опір розтікання безпосередньо під контактом, R_{cb} – контактний опір нижнього контакту, R_p – опір зонду або дротини (проводу). Зазвичай нижній контакт має велику площу, і, отже, порівняно малий супутній контактний опір. Отже, контактним опором нижнього контакту часто нехтують. Подібно до цього, опір зонду також вважається малим.

Опір розтікання плоского непроникаючого контакту круглої форми радіусу r на поверхні напівпровідника з питомим опором ρ і товщиною t дорівнює:

$$R_{sp} = \frac{\rho}{2\pi r} \arctg(2t/r) \quad (3)$$

У випадку $2t \gg r$ справедливе співвідношення:

$$R_{sp} = \frac{C\rho}{4r}. \quad (4)$$

В цій формулі C – коригувальний множник, який залежить від ρ, r та розподілу струму. Для далеко рознесених контактів, як на схемі (б), що знаходяться на однорідно легованій напівобмеженій підкладці, $C = 1$. Якщо струм втікає вертикально у верхній контакт, як на схемі (а), то контактний опір дорівнює:

$$R_c = \rho_c / A_c = \rho_c / \pi r^2 \quad (5)$$

Співвідношення (1) показує, що за малих R_{cb} та R_p контактний опір буде різницею між загальним опором і опором розтікання. Але опір розтікання незалежно виміряти не можна. Отже, навіть малі похибки в опорі розтікання призведуть до значних похибок у значенні контактного опору. Отже, двоклемний метод найкраще працює, коли $R_{sp} \ll R_c$, тобто у випадку контактів малого радіусу.

Модифікацією двоклемного методу є використання верхніх контактів різних діаметрів. Отже, за відомими значеннями R_t можна визначити і побудувати залежність R_c від $1/A_c$ і за нахилом відповідного графіка визначити ρ_c . В якості альтернативи можна побудувати графік загального опору як функції $1/r$. Використовуючи контакти різних діаметрів, з форми кривої можна визначити, чи не є дані аномальними.

Двоклемний метод найчастіше реалізується з використанням горизонтальної (поверхневої) структури, зображеної на рис. 2.

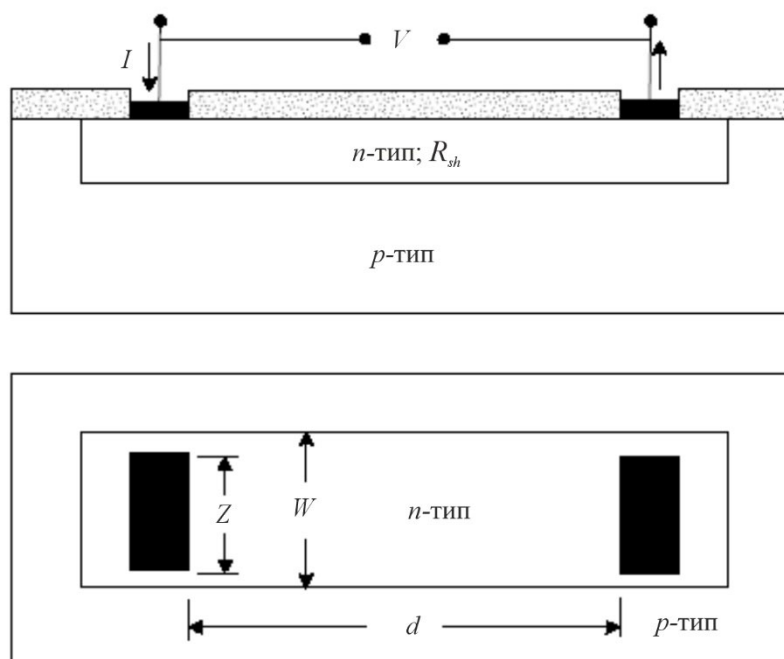


Рис. 2. Поверхнева (горизонтальна)структура для реалізації двоклемного методу вимірювання контактного опору в розрізі і в плані [10].

Вона відрізняється від структури, зображеної на рис. 1 б тим, що струм обмежується острівцем n -типу. Тестова структура складається з двох контактів, розділених відстанню d . З метою обмеження струму область, в якій розташовані контакти, повинна бути ізольована від решти підкладки шляхом легування або дифузії так, щоб, наприклад, у p -підкладці утворити область n -типу шляхом планарної технології або ж хімічного витравлювання області, що оточує острівця із залишенням «мези». Острівця в цьому прикладі має ширину W і в ідеальному випадку таку ж ширину повинні мати контакти. Однак це важко зробити, тому ширина контактів Z зазвичай відрізняється від W . В цьому випадку аналіз ускладнюється за рахунок горизонтального протікання струму, зростання його густини поблизу контактів та геометрії зразка. Для геометрії, зображеної на рис. 2, загальний опір дорівнює:

$$R_T = R_{sh}d/W + R_d + R_w + 2R_c. \quad (6)$$

В цій формулі R_{sh} – поверхневий опір n -шару, R_d – поправка на зміну струму поблизу контакту, R_w – поправка на ширину контакту, якщо $Z < W$. Вирази для опорів, що фігурують у формулі (6), дано в праці [10].

Для випадку багатьох контактів застосовується так званий «метод контактної ланцюга», схему якого зображено на рис. 3.

В цій схемі загальний опір між кожною парою контактів визначається як сума опору напівпровідника, контактної опору і опору металу. Опір напівпровідника розраховується за відомим поверхневим опором і геометрією ланцюга. Віднімаючи опір напівпровідника від загального опору отримуємо загальний контактний опір. Контактний опір кожного контакту отримується шляхом ділення результату на подвоєну кількість контактів.

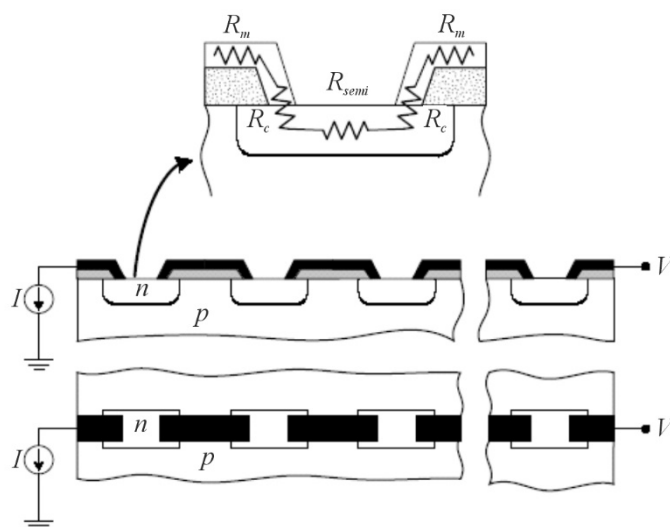


Рис. 3. Схема методу «контактного ланцюга» і зображення тестової структури в плані і в розрізі [10].

В цій схемі загальний опір між кожною парою контактів визначається як сума опору напівпровідника, контактного опору і опору металу. Опір напівпровідника розраховується за відомим поверхневим опором і геометрією ланцюга. Віднімаючи опір напівпровідника від загального опору отримуємо загальний контактний опір. Контактний опір кожного контакту отримується шляхом ділення результату на подвоєну кількість контактів. Для контактної ланцюга, який складається з N острівців і $2N$ контактів шириною W , розділених відстанню за умови нехтування опором металу справедливе наступне співвідношення:

$$R_T = \frac{NR_{sh}d}{W} + 2NR_c \quad (7)$$

Цей метод є надто грубим для точної оцінки контактного опору. Однак він доволі часто використовується для контролю технологічного процесу.

1.1.2 Багатоcontactний двоклемний метод

Схему методу зображено на рис. 4, тестову структуру для його реалізації – на рис. 5.

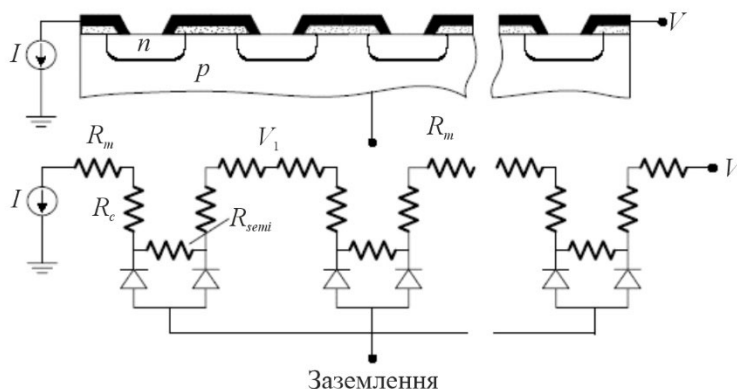


Рис. 4. Схема багатоcontactного двоклемного методу [10].

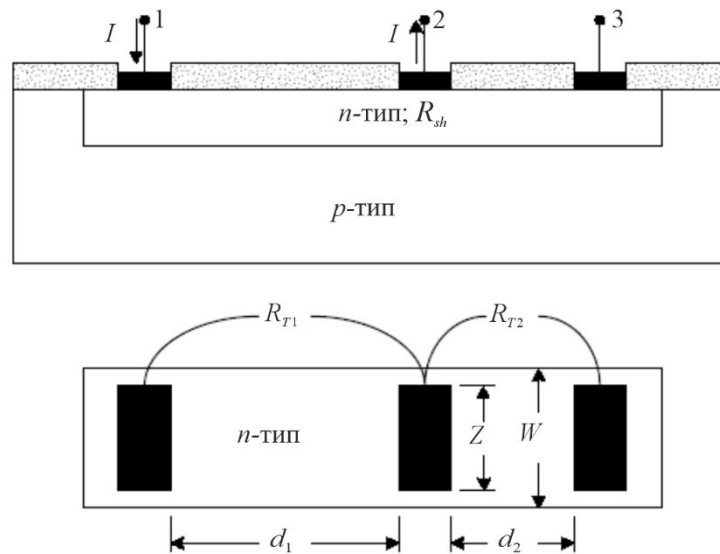


Рис. 5. Тестова структура для реалізації багато контактного двоклемного методу [10].

Даний метод було розроблено з метою усунення недоліків двоконтактного двоклемного методу. В його рамках створюються три однакових контакти до напівпровідника, розділених відстанями d_1 та d_2 . В припущенні, що контактні опори усіх трьох контактів однакові, загальний опір можна визначити так:

$$R_{Ti} = \frac{R_{sh}d_i}{W} + 2R_c. \quad (8)$$

Тому, підставляючи $i=1,2$ і розв'язуючи відповідну систему рівнянь відносно R_c , отримаємо:

$$R_c = \frac{R_{T2}d_1 - R_{T1}d_2}{2(d_1 - d_2)}. \quad (9)$$

Такий тестовій структурі не притаманні невизначеності простої двоклемної структури, оскільки немає необхідності знати об'ємний і поверхневий опір напівпровідника. Припущення про однаковість контактних опорів усіх трьох контактів дещо сумнівне, однак має підстави, якщо зразок не дуже великий. Контактний опір визначається через різницю двох великих величин. Це може створювати труднощі, особливо для контактів з малим опором. Визначення відстаней d_1 та d_2 являє собою додаткове джерело неточностей. Випадково даний метод може дати і від'ємне значення для контактного опору.

Структура на рис. 5 дозволяє визначити лише *контактний опір*. Питомий контактний опір не може бути прямо визначений з двох вимірювань опору. Знаходження R_c вимагає більш детальної оцінки розподілу струму в області горизонтального контакту і поза ним. Ранні дослідження двовимірного розподілу струму у дифузійних резисторах, проведені Кенеді та Марлі, показали, що існує згущення струму в контактах. Аналіз в припущенні нульового контактного опору показав, що лише частина довжини контакту є активною при передачі струму від напівпровідника до металу і навпаки. Було знайдено, що ця частина приблизно дорівнює товщині дифузійного напівпровідникового шару.

Розглянемо тепер деякі тестові структури для вимірювання контактного опору, які зображено на рис. 6.

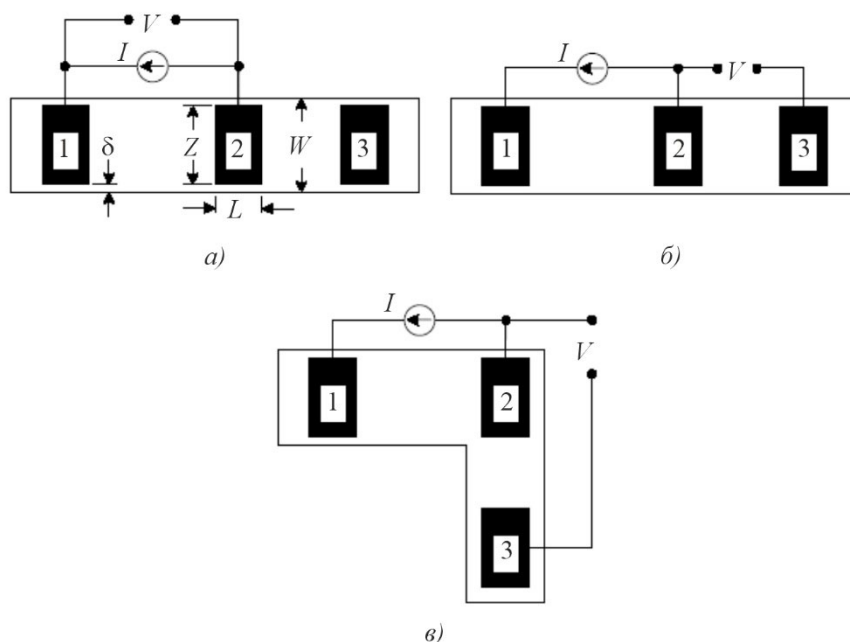


Рис. 6. Тестові структури для вимірювання контактної опору:
а) звичайна; б) для вимірювання контактної опору кінцевого контакту;
в) тестова структура Кельвіна типу «перехресний міст» [10].

В усіх цих структурах струм протікає від контакту 1 до контакту 2. В тестовій структурі для реалізації методу лінії передачі, зображений на рис. 6 а, яка також називається *структурою для вимірювання опору переднього контакту*, напруга вимірюється між тими самими контактами, що й струм. В тестовій структурі, зображений на рис. 6 б, напруга вимірюється між контактами 2 і 3. В тестовій структурі для вимірювання контактної опору методом Кельвіна (рис. 6 в), який вважається одним з найбільш точних, напруга вимірюється під прямим кутом до струму.

Розглянемо тепер вирази для опорів в цих схемах. В схемі б опір переднього контакту дорівнює:

$$R_{cf} = V/I = \frac{\sqrt{R_{sh}\rho_c}}{Z} \operatorname{cth}(L/L_T) = \frac{\rho_c}{L_T Z} \operatorname{cth}(L/L_T), \quad (10)$$

якщо $Z = W$. Якщо ж зразок ширший, ніж контакт, то формула (10) є лише наближеною.

Зазвичай вважається, що $R_{cf} = R_c$. Загальна формула (10) допускає ряд спрощень. Наприклад, якщо $L < 0.5L_T$, то $\operatorname{cth}(L/L_T) \approx L_T/L$, отже,

$$R_c = \frac{\rho_c}{LZ}. \quad (11)$$

Якщо ж $L > 1.5L_T$, то $\operatorname{cth}(L/L_T) \approx 1$, отже

$$R_c = \frac{\rho_c}{L_T Z}. \quad (12)$$

В першому випадку істинна площа контакту співпадає з його ефективною площею. Однак у другому випадку ефективна площа контакту менша від істинної. Це веде до ряду важливих наслідків. Для прикладу розглянемо структуру з поверхневим опором 20 Ом/кв і питомим контактним опором 10^{-7} Ом·см². В цьому випадку «характерна довжина передачі» дорівнює 0.7 мкм. Для контакту довжиною 10 мкм і шириною 50 мкм істинна контактна площа дорівнює $5 \cdot 10^{-6}$ см². Однак ефективна площа контакту дорівнює лише $3.5 \cdot 10^{-7}$ см². Таким чином густина струму в контакті стає у 14 разів більшою, ніж у випадку, коли весь контакт є активним. Таке підвищення густини струму в контакті викликає проблеми, пов'язані з деградацією контакту. Зменшена площа контакту прогоряє в екстремальних випадках і активна ділянка контакту поступово зсувається аж до повного його руйнування.

Модель контакту, зображена на рис. 6, може виявитись надто спрощеною у випадку для ряду контактів. Наприклад, у випадку сплавних контактів контактна область складається з металу, області сплавлення і прилеглого шару напівпровідника. Контакти, які отримуються шляхом напилення металу на тонкий шар вузькозонного або широкозонного напівпровідника, також потрапляють у цю категорію. Це вимагає більш складної моделі лінії передачі, а саметришарової. Тоді відповідні рівняння істотно ускладнюються.

Коли напруга вимірюється між контактами 2 і 3 в той час, як струм тече між контактами 1 і 2 (рис. 6 б), відповідний контактний опір дорівнює:

$$R_{ce} = V/I = \frac{\sqrt{R_{sh} \rho_c}}{Z \operatorname{sh}(L/L_T)} = \frac{\rho_c}{L_T Z \operatorname{sh}(L/L_T)}. \quad (13)$$

Вимірювання опору кінця контакту може бути використане для визначення питомого контактного опору через вимірювання R_{ce} і використання ітерації співвідношення (13). У випадку коротких контактів R_{ce} чутливе до змін довжини контакту, тому помилка у визначенні L лімітує точність методу. Для контактів великої довжини R_{ce} стає малим і точність його визначення лімітується похибкою приладів. Це можна побачити, побудувавши відношення

$$\frac{R_{ce}}{R_{cf}} = \frac{1}{\operatorname{ch}(L/L_T)}, \quad (14)$$

яке стає дуже малим для $L \gg L_T$.

Для випадку тестової структури Кельвіна (рис. 6 в) контакт 3 знаходиться в стороні від контактної лінії 1 – 2. Тому вимірювана напруга являє собою середнє значення потенціалу по довжині контакту, тобто:

$$V = L^{-1} \int_0^L V(x) dx, \quad (15)$$

Інтегруючи, отримаємо:

$$R_c = V/I = \frac{\rho_c}{LZ}, \quad (16)$$

Рівняння (13) припускає, що ширина контакту Z дорівнює ширині напівпровідникового шару. Це рідко реалізується на практиці. Зазвичай $Z < W$. Експерименти при $Z = 5$ мкм і W в діапазоні від 10 до 60 мкм показує що метод вимірювання опору кінця контакту дає помилково великий контактний опір. Помилка зростає, якщо ρ_c знижується. Або якщо R_{sh} зростає. Джерелом помилки є різниця потенціалів між переднім і заднім краєм контакту, внаслідок якої струм може обтікати краї контактів. Вимірюваний опір пропорційний до поверхневого опору і нечутливий до контактного опору за великих δ . Для справедливості простої одновимірної теорії тестова структура повинна задовольняти умовам $L \leq L_T, Z \gg L$ та $\delta \ll Z$. «Одновимірний» аналіз непридатний, якщо вказані умови не задовольняються. Але точне визначення ρ_c можливе, якщо належним чином підганяти чисельні розрахунки (моделювання) під дані вимірювань.

Проблемі, пов'язаній з тим, що $W \neq Z$ можна запобігти, якщо використовувати колову (кільцеву) тестову структуру, яка складається з провідної внутрішньої області радіусом L , щілини шириною d та внутрішньої контактної області. Провідні області зазвичай металеві, а ширина щілини варіюється від декількох мікронів до десятків мікронів. Структуру показано на рис. 7.

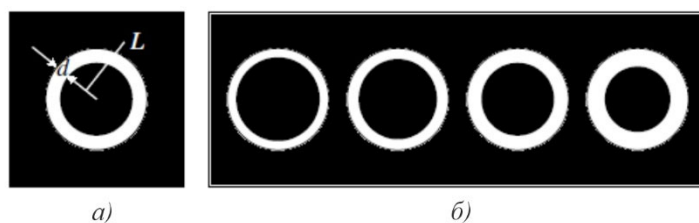


Рис. 7. Окремий елемент колової структури (а) та структура в цілому (б).

Чорні області – метал [10].

Якщо поверхневі опори напівпровідникового шару під металом і у щілині однакові, то для загального опору між зовнішніми і внутрішніми контактами справедливий наступний вираз:

$$R_T = \frac{R_{sh}}{2\pi} \left[\frac{L_T}{L} \frac{I_0(L/L_T)}{I_1(L/L_T)} + \frac{L_T}{L+d} \frac{K_0(L/L_T)}{K_1(L/L_T)} + \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right) \right] \quad (17)$$

В цих формулах $I_m(z)$ та $K_m(z)$ – функції Беселя уявного аргументу та модифіковані функції Беселя відповідних індексів.

Для колової тестової структури лінії передачі, зображеної на рис. 7, за умови $L \gg 4L_T$ відношення I_0/I_1 і K_0/K_1 прямують до одиниці, і, отже, вираз (17) спрощується:

$$R_T = \frac{R_{sh}}{2\pi} \left[\frac{L_T}{L} + \frac{L_T}{L+d} + \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right) \right] \quad (18)$$

Якщо, до того ж, $L \gg d$, то вираз (25) набуває вигляду:

$$R_T = \frac{R_{sh} C}{2\pi L} (d + 2L_T), \quad (19)$$

де

$$C = \frac{L}{d} \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right) \quad (20)$$

Для використовуваних на практиці радіусів близько 200 мкм та ширини щілин в діапазоні 5 – 50 мкм необхідний коректуючий фактор d/L для компенсації відмінності між результатами лінійного методу лінії передачі і розгляду у відповідності з коловою схемою з метою одержання лінійного згладжування експериментальних даних. Без коректуючого фактору питомий контактний опір недооцінюється. Подібно до випадку лінійної структури, скоректовані дані дозволяють оцінити характерну довжину передачі, отже, і питомий контактний опір.

Колова тестова структура має одну істотну перевагу. Вона полягає в тому, що при вимірюваннях немає необхідності ізолювати напівпровідниковий шар, оскільки струм може протікати лише від центрального контакту до оточуючого контакту. В лінійній тестовій структурі для реалізації методу лінії передачі струм може протікати від контакту до контакту через область поза тестовою структурою, якщо вона не ізолювана. Колова тестова структура з чотирма металевими контактами дуже подібна до хрестоподібного мостового резистора Кельвіна, який обговорювався раніше (див. рис. 6 в).

Рівняння (10) і (13) отримано в припущенні, що $\rho_c > 0.2R_{sh}t^2$, де t – товщина овщина шару. Для $R_{sh} = 20$ Ом/кв та $t = 1$ мкм ця умова веде до нерівності $\rho_c > 4 \times 10^{-8}$ Ом·см². Метод лінії передачі має бути модифікований, якщо ця умова не задовольняється, що перевіряється експериментами та моделюванням. Однак більшість контактних опорів є значно більшими, отже, метод лінії передачі придатний.

Трудність у вирішенні питання про те, де саме вимірювати напругу у схемах на рис. 6 призвела до виникнення тестової структури, зображеної на рис. 8 і відповідного до неї «методу довжини передачі», запропонованого Шоклі.

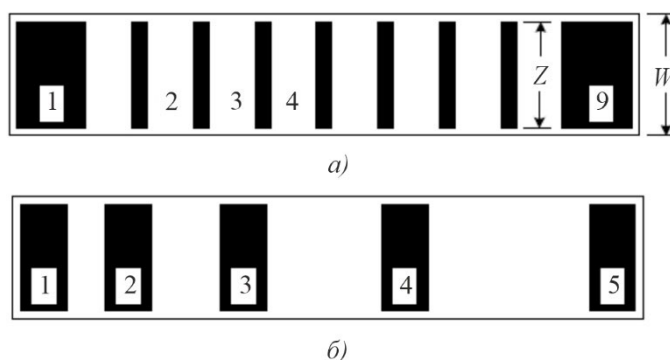


Рис. 8. Тестові структури для реалізації «методу довжини передачі» [10].

Структура для реалізації цього методу дуже схожа на структуру, зображену на рис. 2, однак містить більше, ніж 3 контакти. Два контакти на кінцях тестової структури слугують для входу і виходу струму з вихідної «драбинкової» структури, а напруга вимірюється між одним з великих контактів і кожним з послідовних вузьких контактів як на рис. 8 а. Пізніше було запропоновано структуру, зображено на рис. 8 б, в якій напруга вимірюється між сусідніми контактами.

Структура на рис. 8 б має певні переваги в порівнянні зі структурою, зображеною на рис. 8 а. Якщо напруга в «драбинковій» структурі вимірюється, наприклад, між контактами 1 і 4, то відбувається збурення струму за рахунок наявності контактів 2 та 3. Вплив контактів 2 та 3

залежить від «характерної довжини передачі» L_T та довжини контакту L . Якщо $L \ll L_T$, то струм не проникає відчутним чином у контакт 2 і тому контакти 2 та 3 не впливають на результати вимірювань. Якщо ж $L \gg L_T$, струм протікає в металі і контакт можна уявити як два контакти довжиною L_T , які знаходяться у металевому провіднику. Шунтування струму металевими смужками, вочевидь, впливає на значення вимірюваної напруги, а, отже, і опору. З цієї точки зору структура на рис. 8 б є кращою, оскільки в ній між кожними двома контактами є «чистий» напівпровідник (в тому розумінні, що відповідний проміжок достатній для непроникнення струму у сусідній контакт).

Для контактів, які задовольняють умові $L \geq 1.5L_T$ справедливим є такий вираз для вимірюваного опору переднього контакту:

$$R_T = R_{sh} d / Z + 2R_c \approx \frac{R_{sh}}{Z} (d + 2L_T), \quad (21)$$

де ми використали те ж наближення, яке веде від формули (10) до формули (12).

Залежність вимірюваного контактного опору від d зображено на рис. 9.

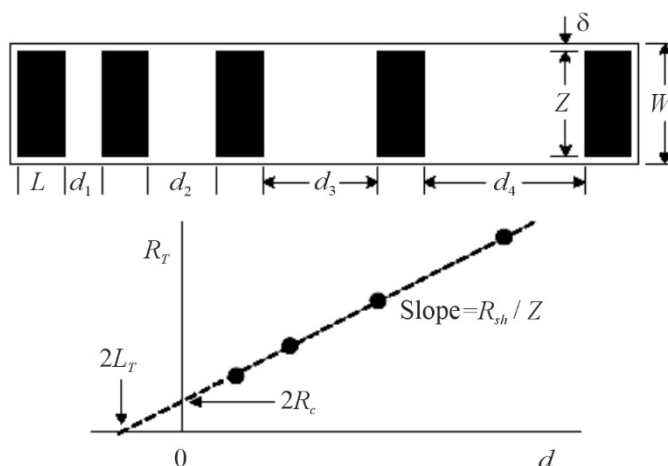


Рис. 9. Тестова структура для реалізації методу «характерної довжини передачі» і залежність вимірюваного загального опору від d [10].

Нахил прямої $\Delta d / d = R_{sh} / Z$ дає можливість визначити поверхневий опір R_{sh} , якщо ширина контакту Z відома з незалежних вимірювань. Точка перетину графіка з вертикальною віссю за умови $d = 0$ дає можливість визначити загальний контактний опір. Точка перетину графіка з горизонтальною віссю за умови $R_T = 0$ дає можливість визначити «характерну довжину передачі», і, отже, питомий контактний опір, оскільки поверхневий опір R_{sh} відомий з нахилу прямої. Таким чином цей метод дає повну характеристику контакту, включаючи поверхневий опір шару напівпровідника, повний контактний опір і питомий контактний опір.

Зазвичай для вимірювання контактного опору використовується саме цей метод, однак він має свої проблеми. Так, точка перетину графіка з горизонтальною віссю не завжди визначається чітко, що веде до невірних значень L_T , а, отже, і R_c . Однак більш серйозну проблему являє невизначеність поверхневого опору шару напівпровідника під контактами. Рівняння (21) справедливе у припущенні однаковості поверхневого опору шару напівпровідника під

контактами і між ними. Однак ці опори можуть відрізнитись між собою за рахунок ефектів, пов'язаних з формуванням контакту. Це вірно для сплавних та «силіцидних» контактів, коли область напівпровідника під контактом модифікується у процесі отримання контакту. В цьому випадку для опору переднього краю контакту і загального опору справедливі такі вирази:

$$R_{cf} = \frac{\rho_c}{L_{Tk} Z} \operatorname{cth}(L/L_{Tk}). \quad (22)$$

$$R_T = \frac{R_{sh} d}{Z} + 2R_k \approx \frac{R_{sh} d}{Z} + \frac{2R_{sk} L_{Tk}}{Z} = \frac{R_{sh}}{Z} \left[d + 2(R_{sk}/R_{sh}) L_{Tk} \right]. \quad (23)$$

У формулі (23) R_{sk} – модифікований поверхневий опір шару напівпровідника під контактом, $L_{Tk} = \sqrt{\rho_c / R_{sk}}$. Нахил залежності R_T від d , як і раніше, визначає R_{sh}/Z і точка перетину з вертикальною віссю дає $2R_c$. Однак, точка перетину з горизонтальною віссю дає $2(R_{sk}/R_{sh}) L_{Tk}$, отже, питомий контактний опір тепер визначити неможливо, оскільки R_{sk} невідоме. Тим не паче, визначаючи R_{cf} методом «характерної довжини передачі» та R_{ce} «методом опору кінця контакту», де:

$$R_{ce} = \frac{\sqrt{R_{sk} \rho_c}}{Z \operatorname{sh}(L/L_{Tk})} = \frac{\rho_c}{Z L_{Tk} \operatorname{sh}(L/L_{Tk})}; \quad R_{cf} = \frac{1}{\operatorname{ch}(L/L_{Tk})}. \quad (24)$$

можна визначити L_{Tk} та ρ_c . Таким чином стає можливим визначення контактного опору та питомого контактного опору на додачу до опору поверхневого шару напівпровідника між контактами та під ними. Також можна відокремити R_{sh} від R_{sk} шляхом витравлювання напівпровідника між контактами.

Визначення електричних параметрів контактів методом лінії передачі базується на припущенні про однаковість електричних та геометричних параметрів контактів по перерізу зразка. Однак ці параметри зазвичай розсіюються по чіпу (пластині). Статистичне моделювання свідчить, що звичайна процедура отримання даних може призвести до похибок навіть в тому випадку, якщо відсутні похибки вимірювання електричних та геометричних параметрів. Для випадку коротких контактів ($L < L_T$) ρ_c може бути визначене, незважаючи на розсіювання інших параметрів, в той час, як помилка у визначенні R_{sk} та R_{sh} має місце лише тоді, коли ρ_c розсіюється по пластині. У випадку довгих контактів знайдені значення ρ_c та R_{sk} мають похибку тоді, коли існує похибка вимірювань. Найкращі результати отримуються, коли $L \geq 2L_T$. Якщо пластина має неоднорідний розподіл електричних параметрів з коливаннями 10 – 30 %, то похибка визначення ρ_c та R_{sk} може сягати 100 – 1000 %. Використання більше ніж однієї тестової структури дає можливість знизити похибки.

1.1.3 Чотирьохклемний метод вимірювання контактного опору

Методи вимірювання контактного опору, які розглядались досі, вимагають знання значення питомого або поверхневого опору напівпровідникового шару. Однак бажаними є такі методи вимірювання R_c та ρ_c , які б дозволяли мінімізувати вклад опорів напівпровідникового шару або й зовсім позбавитись від нього. Метод вимірювання, який найбільше підходить до цієї

мети – це метод Кельвіна, який ґрунтується на структурі Кельвіна з «мостами, що перетинаються». Вперше таку тестову структуру було використано у 1972 р., але лише на початку 80-х років її серйозно оцінили. В принципі цей метод дозволяє виміряти власне контактний опір, не спотворений опорами напівпровідника та металу. Принцип вимірювання ілюструється рис. 10.

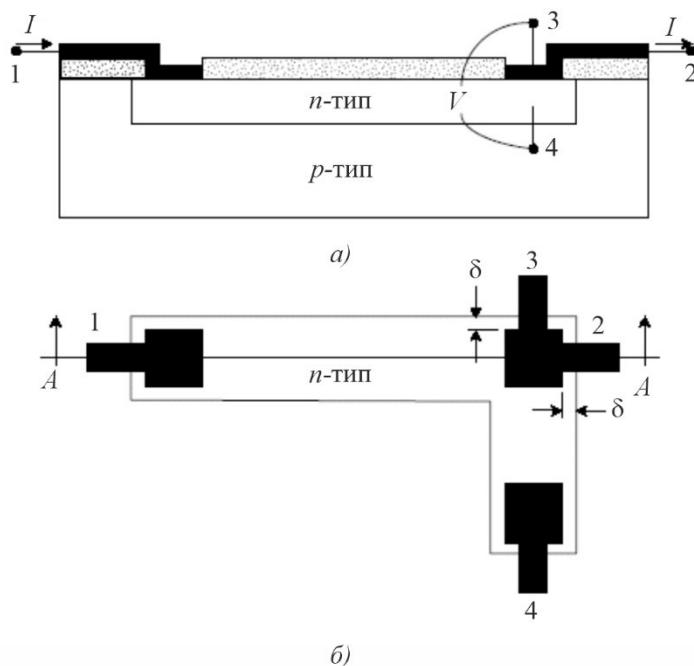


Рис. 10. Тестова структура Кельвіна в розрізі по А-А і в плані [10].

Струм пропускається між контактами 1 та 2, а напруга вимірюється між контактами 3 та 4. Існує три стрибки напруги між контактами 1 і 2. Перший – між пластиною 1 і напівпровідниковим шаром, другий – вздовж поверхні напівпровідникового шару і третій – між n-шаром і пластиною 2/3. Великий вхідний імпеданс вольтметра зумовлює дуже малий струм між контактами 3 та 4. Отже, потенціал на контакті 4 такий самий, як і безпосередньо потенціал n-області під пластиною 2/3, як це ілюструється на рис. 10 а шляхом розміщення точки 4 безпосередньо під контактом 3. Таким чином, вимірювана напруга V_{34} цілком зумовлена стрибком на контакті «метал-напівпровідник». Контактний опір тоді дорівнює:

$$R_c = V_{34}/I, \quad (25)$$

тобто просто відношенню напруги до струму. Отже, питомий контактний опір дорівнює

$$\rho_c = R_c A_c, \quad (26)$$

де A_c – площа контакту.

Цей метод вважається найточнішим, однак співвідношення (26) не завжди узгоджується з експериментальними даними. Питомий контактний опір, розрахований у відповідності з (26) є уявним контактним опором, спотвореним поверхневим згущенням струму у випадку, якщо контактні вікна менші за дифузійний проміжок, позначений як δ на рис. 10. Викривлення контактного вікна до дифузійного шару і горизонтальна дифузія легуючої домішки враховуються за умови $\delta > 0$. Ідеальний випадок $\delta = 0$ ілюструється рис. 11 а. В реальному

контакті частина струму, показана стрілками на рис. 11 б, обтікає металевий контакт. В ідеальному випадку, коли $\delta = 0$, стрибок потенціалу $V_{34} = IR_c$.

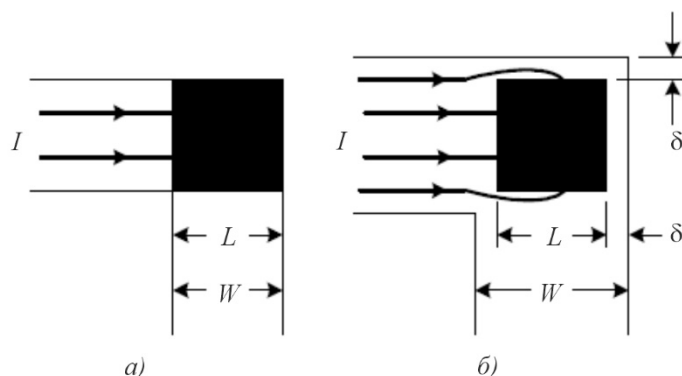


Рис. 11. Тестові структури Кельвіна: а) ідеальна; б) з урахуванням горизонтального протікання струму навколо контакту і під ним [10].

У випадку ж $\delta \neq 0$ горизонтальний струм створює додатковий стрибок напруги, який включається у V_{34} і призводить до більшого значення вимірюваної напруги. У відповідності зі співвідношенням (26) ρ_c зростає, якщо використовується істинна площа контакту. Отримане таким чином значення ρ_c відоме як уявний питомий контактний опір. Помилка, яка вноситься вказаним вище геометричним фактором, більша для нижчих значень ρ_c , та (або) вищих R_{sh} і менша для вищих значень ρ_c , та (або) нижчих R_{sh} . Вертикальний стрибок напруги в напівпровіднику, нормальний до площини контакту, як правило, до уваги не береться, хоча він теж вносить поправку.

1.1.4 Шестиклемний метод вимірювання контактного опору

Схему шестиклемного методу вимірювання контактного опору показано на рис. 12.

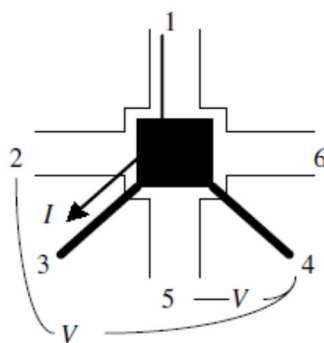


Рис. 12. Схеми шестиклемного методу вимірювання контактного опору, яка дозволяє одночасно визначити $R_c, R_{ce}, R_{cf}, R_{sk}$ [10].

Відповідна тестова структура являє собою чотирьохклемну тестову структуру Кельвіна з двома додатковими контактами для створення додаткових можливостей, не притаманних звичайній структурі Кельвіна. Ця структура дозволяє визначати контактний опір, питомий

контактний опір, опір початку контакту, опір кінця контакту та поверхневий опір напівпровідника. У випадку звичайної структури Кельвіна струм закачується між контактами 1 і 3 і напруга вимірюється між контактами 2 і 4. Тоді $R_c = V_{24}/I$, і, отже, $\rho_c = R_c/A_c$. Проблеми, що впливають з розгляду в рамках двомірної моделі, для шестиклемної структури зберігаються.

Для вимірювання опору кінця контакту у відповідності із співвідношенням $R_{ce} = V_{54}/I$ струм пропускається між контактами 1 та 3, а напруга вимірюється між контактами 5 та 4. За відомих контактних опорів і питомого контактного опору, визначених раніше, поверхневий опір напівпровідника під контактом може бути визначений через опори R_{ce} та R_{cf} зі співвідношень (10) та (24).

2. Вимірювання електричного контактного опору в термоелектриці

Відомо, що вплив контактного опору на ефективність термоелектричного пристрою зростає в міру його мініатюризації. Популярні в мікроелектроніці методи вимірювання контактного опору придатні для тонких плівок, але не можуть бути безпосередньо перенесені на випадок масивного ТЕ-матеріалу. Автори [11] пропонують метод вимірювання контактного опору для випадку масивних ТЕ-матеріалів шляхом виготовлення і випробування пачок пластин ТЕ-матеріалу, вкритих металом, з використанням традиційного для виготовлення термоелектричних пристроїв технологічного процесу. Співвідношення для термоелектричної добротності Z пачки використовується з метою виділення контактного опору і зниження чутливості результатів до опору ТЕ-матеріалу. Перевагою цієї техніки є те, що вона відображає реальний технологічний процес виготовлення ТЕ-пристроїв і з максимальною точністю копіює структури, подібні до реальних ТЕ-пристроїв. Найменші значення електричного контактного опору, які вдалось виміряти цим методом при 300 К склали $1.1 \cdot 10^{-6}$ та $1.3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² відповідно для матеріалів n - та p -типу. Похибка вимірювань для кожного зразка складає від 10 до 20 %, що прийнятно при вимірюванні контактних опорів порядку 10^{-6} Ом·см².

Удосконалений метод вимірювання контактного опору за термоелектричною добротністю в режимі охолодження, описаний в [11] зводиться до наступного. Відомо, що максимальна холодопродуктивність Q термоелемента визначається як:

$$Q_{\max} = \frac{1}{2L} \left[\frac{\alpha^2 T_c^2}{(2\rho + 4\rho_c/L)} - k\Delta T \right]. \quad (27)$$

У цій формулі L – довжина термоелектричної гілки, α – коефіцієнт Зеебека, T_c – температура холодного спаю, ρ – питомий опір напівпровідника, ρ_c – контактний опір, k – коефіцієнт теплопровідності, ΔT – перепад температур. Вважається, що вплив контактного опору на продуктивність холодильника є істотним, якщо довжини гілок дорівнюють 200 мкм або менше. Питомий контактний опір виміряти важко, якщо він менший за 10^{-6} Ом·см². З метою кількісної оцінки контактного опору на Bi_2Te_3 було розроблено і застосовано пачкоподібну структуру, яка імітує реальний пристрій. Технологічний процес виготовлення пачкоподібної структури був подібним до процесу виготовлення реального термоелектричного охолоджувача, так що контактний опір відтворювався добре. Пачкоподібна структура виготовлялась з декількох пластин термоелектричного матеріалу. Пластини були з'єднані між собою в єдиному процесі і розрізані на «кубики», як показано на рис. 13.

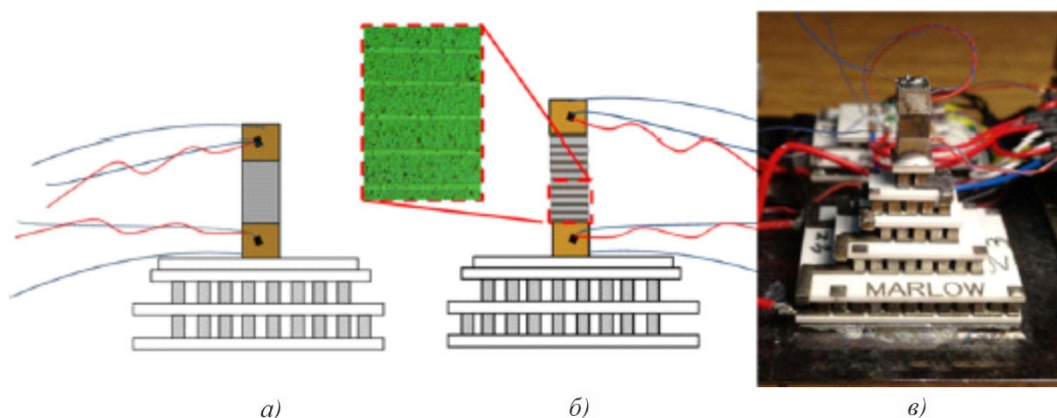


Рис. 13. Спосіб вимірювання контактного опору за добротністю [11]: а) – контрольний зразок; б) – пачкоподібна структура; в) – загальний вигляд вимірювального стенду.

Процес виготовлення зразків показано на рис. 14.

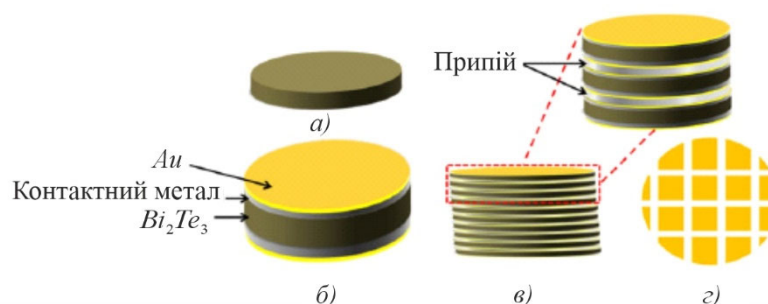


Рис. 14. Послідовні стадії процесу виготовлення зразків [11]: а) – одинична пластина після притирання; б) – пластина після травлення і осадження контактного шару; в) – готова пачка з 10 пластин після спаювання; г) – пачка пластин, розрізана на кубики.

Виготовлення зразків здійснювалось наступним чином. Спочатку пластини притирились до товщини 250 мкм. Склад ТЕ-матеріалів був приблизно такий: *n*-тип – $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.9}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0.1}$, *p*-тип – $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.75-0.80}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.2-0.25}$. Після притирання пластини проходили обробку поверхні і осадження металу. Золото осаджувалось на поверхню металевих контактів з метою запобігання окисленню поверхні і забезпечення змочування її припоєм. Після осадження металу пластини вміщувались у спеціальний затискний пристрій. Припій наносився вручну з використанням керамічних смужок для забезпечення площинності та гладкості поверхні. Далі одна пластина вміщувалась на другу і обережно притискалась. Надлишок припою видалявся. Процес продовжувався до формування пачки з 10 пластин. Для формування пачок застосовувався олов'яно-сурм'яний припій. Після цього готові пачки вміщувались у піч. Багатьма випробуваннями перевірялась однорідність припою і відтворюваність технологічного процесу формування пачок. Після цього готові пачки розрізались на квадрати зі стороною 3.8 мм. Мідні накладки з струмопровідними проводами напаявались на кінці кожної пачки. З метою виготовлення контрольних зразків з тими ж термоелектричними властивостями з суміжного куска кожного з відповідних зливок виготовлялись суцільні пластини висотою 2.5 мм. Контрольні зразки і пачки вміщувались у стенд для вимірювання добротності і вимірювались термоелектричні властивості в діапазоні температур від 260 до 340 К.

Термоелектрична добротність вимірювалась модифікованим методом Хармана.

Вимірювався також коефіцієнт Зеєбека α та питомий опір ρ . Вимірювальну установку було відкалібровано таким чином, щоб забезпечити похибку вимірювань не більше 2 %.

Суть методу вимірювання полягає в наступному. Добротність контрольного зразка дорівнює:

$$Z_{\text{control}} = \frac{\alpha^2 L}{k(\rho L + 2\rho_c)} \quad (28)$$

В той же час добротність пристрою у вигляді пачки дорівнює:

$$Z_{\text{stack}} = \frac{\alpha^2}{k(\rho + 2\rho_c/t)} \quad (29)$$

Зрозуміло, що за рахунок малості середньої віддалі t між пластинами в пачці різниця між Z_{control} та Z_{stack} може бути зроблена досить відчутною і, отже, точність визначення питомого контактного опору ρ_c істотно підвищена. Ділячи (28) на (29) і розв'язуючи отримане рівняння відносно ρ_c отримаємо:

$$\rho_c = \frac{\rho L}{2} \left(\frac{Z_{\text{ratio}} - 1}{L t^{-1} - Z_{\text{ratio}}} \right) \quad (30)$$

В цій формулі

$$Z_{\text{ratio}} = Z_{\text{control}} / Z_{\text{stack}} \quad (31)$$

Для підвищення точності необхідно виготовити декілька контрольних зразків і декілька пачок і взяти середні значення відповідних добротностей, виміряних модифікованим методом Хармана.

Авторами праці [11] було використано усереднення по 5 пачках і 3 контрольних зразках. Таким чином в кожному експерименті виконувалось усереднення більш по 100 поверхнях розділу. За рахунок основного вкладу контактного опору в зміну добротності пачки температурний вплив шарів припою при розрахунках до уваги не брався. Результати розрахунків контактної показують, що при використанні стандартного процесу 1 питомий контактний опір в середньому складає $3.6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² та $2.7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² для матеріалів p та n -типу відповідно. Для процесу 1 точність визначення контактної опору узгоджується з моделями та результатами вимірювання холодопродуктивності реальних охолоджувачів з довжинами гілок 0.45 мм. Початкові результати для процесу 2 показали істотне зниження контактної опору. А саме, питомі контактні опори для матеріалів p та n -типу склали $1.1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² та $1.3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Максимальна невизначеність у значеннях контактної опору не перевищує 20 %, що досить добре для визначення контактних опорів порядку 10^{-6} Ом·см². Коли контактний опір спадає, розраховане значення ρ_c стає більш чутливим до варіацій добротності зразків. Отже, для вимірювання контактних опорів в межах $5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² зразки попередньо мають бути перевірені на зниження стандартного відхилення вимірюваних значень добротності. Однією з багатьох переваг даного методу є можливість визначення контактної опору в широкому інтервалі температур, і таблиця 1 показує зниження контактної опору зі зниженням температури, що чітко відбиває температурну залежність об'ємних опорів у відповідності з «ефектами звуження».

Висновки

1. Найбільш точним методом вимірювання електричного контактного опору є метод Кельвіна у його шестиклемній модифікації. Цей метод успішно використовується в мікроелектроніці. Інформація про його застосування в термоелектриці в літературі відсутня.
2. Єдиним відомим методом вимірювання контактного опору паяних металевих контактів до термоелектричного матеріалу є модифікований метод, який ґрунтується на вимірюванні добротності пачки пластин ТЕМ з багатьма контактами. Цей метод потребує вдосконалення для зменшення похибки вимірювання контактного опору, яка складає 20 %.

Література

1. Cox R.H., Strack H. (1969). *Sol. St. Electron.*, 12, 89.
2. Heime K., Konig U., Kohn E., Wortmann A. (1974). *Sol. St. Electron.*, 17, 835.
3. Berger H.H. J. (1972). *Electrochem. Soc.*, 119, 507.
4. Gutai L., Mojres T. *Appl. Phys. Lett.* (1975). 26, 325.
5. Misra P., Nagaraju J. (2004). Test facility for simultaneous measurement of electrical and thermal contact resistance. *Rev. Sci. Instr.*, Aug.2004, doi 10.1063/1.1775316
6. Maheshappa N.D., Nagaraju J., Krishna Murthy N.V. (1998). A facility for electrical resistance contact measurement. *Rev. Sci. Instr.*, Mar.1998, doi 10.1063/1.1148810
7. Deepak, Krishna H. (2007). Measurement of small specific contact resistance of metals with resistive semiconductors. *J. El. Mat.*, 36 (5), 598 – 605, doi 10.1007/s11664-007-0091-y
8. Maheshappa H.D., Nagaraju J., Krishna Murthy M.V. (1998). A facility for electrical resistance contact measurement. *Rev. Sci. Instr.*, Mar. doi 10.1063/1.1148810
9. Holgate T.C., Han L., Wu NY, Bojesen E.D., Cristensen M., Iversen Bo.B., Nong N.V., Pryds N. *Characterization of the interface between Fe-Cr alloy and the p-type thermoelectric oxide Ca₃Co₄O₉*.
10. Schroder D.K. (2006). *Semiconductor material and device characterization*. IEEE press. A John Wiley & Sons, Inc. Publication.
11. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. (2013). Practical contact resistance measurement method for bulk Bi₂Te₃ based thermoelectric devices. *J. El. Mat.*

Надійшла до редакції: 12.01.2022.

Vykhov L.M., DSc (Phys-Math)¹

Gorskyi P.V., DSc (Phys-Math)^{1,2}

Lysko V.V., Cand.Sc (Phys-Math)^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatykh@gmail.com

An overview of existing methods for measuring electrical contact resistance is presented. An analysis of their accuracy, advantages and disadvantages, as well as the possibilities of using them in thermoelectricity for the study and optimization of "metal – thermoelectric material" structures is conducted. Bibl. 11, Figs 14.

Key words: electrical contact resistance, measurement, accuracy, thermoelectric power converters.

References

12. Cox R.H., Strack H. (1969). *Sol. St. Electron.*, 12, 89.
13. Heime K., Konig U., Kohn E., Wortmann A. (1974). *Sol. St. Electron.*, 17, 835.
14. Berger H.H. J. (1972). *Electrochem. Soc.*, 119, 507.
15. Gutai L., Mojres T. *Appl. Phys. Lett.* (1975). 26, 325.
16. Misra P., Nagaraju J. (2004). Test facility for simultaneous measurement of electrical and thermal contact resistance. *Rev. Sci. Instr.*, Aug.2004, doi 10.1063/1.1775316
17. Maheshappa N.D., Nagaraju J., Krishna Murthy N.V. (1998). A facility for electrical resistance contact measurement. *Rev. Sci. Instr.*, Mar.1998, doi 10.1063/1.1148810
18. Deepak, Krishna H. (2007). Measurement of small specific contact resistance of metals with resistive semiconductors. *J. El. Mat.*, 36 (5), 598 – 605, doi 10.1007/s11664-007-0091-y
19. Maheshappa H.D., Nagaraju J., Krishna Murthy M.V. (1998). A facility for electrical resistance contact measurement. *Rev. Sci. Instr.*, Mar. doi 10.1063/1.1148810
20. Holgate T.C., Han L., Wu NY, Bojesen E.D., Cristensen M., Iversen Bo.B., Nong N.V., Pryds N. *Characterization of the interface between Fe-Cr alloy and the p-type thermoelectric oxide Ca₃Co₄O₉.*
21. Schroder D.K. (2006). *Semiconductor material and device characterization*. IEEE press. A John Wiley & Sons, Inc. Publication.
22. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. (2013). Practical contact resistance measurement method for bulk Bi₂Te₃ based thermoelectric devices. *J. El. Mat.*

Submitted: 12.01.2022.