

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2022-01-03-13

Осадчук О. В., д. т. н., проф. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Я. О., к. т. н. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. osadchuk.j93@gmail.com

Думенко Д. О. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. doomdenny@gmail.com

Стальченко О. В., к. т. н. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна. stalchenko.o.v@vntu.edu.ua

Анотація: В статті розглянуті основні методи вимірювання опору в напівпровідникових матеріалах, які дають змогу отримати точні результати для правильного визначення необхідних параметрів компонентів напівпровідникових систем. Використання даних методів дозволяє відносно точно оцінити властивість кінцевого компоненту для застосування в реальних умовах по заданих розрахунках. Аналіз сучасних систем вимірювання параметрів компонентів показав, що в реальних працюючих системах стаються збої через неперевірені властивості компонентів ще на етапі Vinnytsia, Ukraine, виробництва таких систем, а також готові системи, через деякий час роботи, перестають відповідати заданим вимогам, через що їхнє застосування являється недоцільним, адже вже не виконує у необхідному обсягу поставлених завдань та цілей. Насамперед, це наслідок деградації матеріалу компонента з якого він був виготовлений, під впливом високих температур або порушення режимів роботи. Проте, велика кількість таких проблем виникає через відсутність необхідного контролю параметрів того чи іншого компонента на етапах виробництва готових систем. Тому, впровадження вимірювань параметрів компонентів актуально на найперших етапах, що дозволить підвищити надійність таких систем як наслідок, а в першу чергу це забезпечить відповідність роботи системи тим вимогам й режимам які закладалися на моменті формування технічного завдання майбутньої розробки. Одним із таких параметрів є опір напівпровідникових компонентів, правильне вимірювання якого є досить складним процесом, яке потребує дороговартісного високоточного обладнання та додаткових приготувань матеріалу. Але в залежності від цілей, матеріалів та конкретних вимог можливе застосування того, чи іншого методу вимірювання опору в напівпровідникових матеріалах, що повинно забезпечити необхідну нам точність й надати результати, опираючись на які можливо суттєво покращити вибір правильного режиму роботи пристрою, його працездатність в цілому, надійність та довговічність роботи системи.

Ключові слова: система, зонд, питомий опір, вимірювання, щуп, джерело струму, напівпровідник, чотиризондовий пристрій з частотним виходом, шестизондовий пристрій з частотним виходом.

Vinnytsia, Ukraine,

RESISTANCE MEASUREMENT METHODS SEMICONDUCTOR MATERIALS

Alexander Osadchuk, Dr.habil., Prof. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. osadchuk.av69@gmail.com

Iaroslav Osadchuk, Ph.D.Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. osadchuk.j93@gmail.com

Denys Dumenko. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, doomdenny@gmail.com

Alexander Stalchenko, Ph.D.Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. stalchenko.o.v@vntu.edu.ua

Abstract: The article discusses the main methods for measuring resistance in semiconductor materials, which allow obtaining accurate results for the correct determination of the required parameters of the components of semiconductor systems. The use of these methods allows a relatively accurate assessment of the quality of the finished component for use in real conditions according to the specified calculations.

Analysis of modern systems for measuring the parameters of components showed that in real working systems failures occur due to untested properties of components even at the stage of production of such systems, as well as finished systems, after some time of operation, cease to meet the specified requirements, which is why their use is - is inexpedient, which no longer fulfill the assigned tasks in the required volume. First of all, this is a consequence of the degradation of the material of the semiconductor component from which it was made, under the influence of high temperatures or violation of operating modes. However, a large number of such problems arise due to the lack of the necessary control of the parameters of one or another component at the stages of production of finished systems. Therefore, the introduction of measurements of the parameters of components is relevant at the first stages, which will increase the reliability of such systems as a consequence, and, first of all, this will ensure that the system works with those requirements and modes that were laid down at the time of the formation of the technical specifications for future development. One of these parameters is the resistance of semiconductor components, the correct measurement of which is a rather complicated process that requires expensive high-precision equipment and additional material preparation. But depending on the goals, materials and specific requirements, it is possible to use one or another method of measuring resistance in semiconductor materials, it should provide the accuracy we need and provide results, based on which it is possible to significantly improve the choice of the correct mode of operation of the device, its overall performance, reliability and durability of the system.

Key words: system, probe, resistivity, measurements, probe, current source, semiconductor, four-probe device with frequency output, six-probe device with frequency output

Вступ

Одним із найважливіших параметрів при дослідженні напівпровідникових матеріалів є питомий опір. Електричний питомий опір – це основна властивість матеріалу, яка кількісно визначає опір матеріалу потокові струму, це зворотна провідність. Опір матеріалу залежить від кількох факторів, включаючи легування матеріалу, обробку та фактори навколишнього середовища, такі як температура чи вологість [1 - 3]. Опір матеріалу може впливати на характеристики пристрою (компонента), що з нього виготовлений, такі як послідовний опір, порогова напруга, ємність та інші параметри.

Методи вимірювання опору в напівпровідникових матеріалах, які дають змогу отримати точні результати для правильного визначення необхідних параметрів компонентів напівпровідникових систем. Використання даних методів дозволяє відносно точно оцінити властивість кінченого компоненту для застосування в реальних умовах по заданих розрахунках. Аналіз сучасних систем вимірювання параметрів компонентів показав, що в реальних працюючих системах стаються збої через неперевірені властивості компонентів ще на етапі виробництва таких систем, а також готові системи, через деякий час роботи, перестають відповідати заданим вимогам, через що їхнє застосування є недоцільним, адже вже не виконує у необхідному обсягу поставлених завдань та цілей. Насамперед, це наслідок деградації матеріалу компонента з якого він був виготовлений, під впливом високих температур або порушення режимів роботи. Проте, велика кількість таких проблем виникає через відсутність необхідного контролю параметрів того чи іншого компонента на етапах виробництва готових систем. Тому, впровадження вимірювань параметрів компонентів актуально на найперших етапах, що дозволить підвищити надійність таких систем як наслідок, а в першу чергу це забезпечить відповідність роботи системи тим вимогам й режимам які закладалися на моменті формування технічного завдання майбутньої розробки. Одним із таких параметрів є опір напівпровідникових компонентів, правильне вимірювання якого є досить складним процесом, яке потребує дороговартісного високоточного обладнання та додаткових приготувань матеріалу [2-5].

Метою роботи є розгляд методів вимірювання опору в напівпровідникових матеріалах, які здатні забезпечити необхідну точність вимірювань, не вносячи паразитних змін в параметри напівпровідникового матеріалу для мікро- та наноелектронної техніки.

Визначення питомого опору напівпровідникового матеріалу є загальним як для дослідницьких, так і для виробничих середовищ. Існує багато методів визначення питомого опору матеріалу, але техніка може варіюватися залежно від типу матеріалу, величини опору, форми та товщини матеріалу, ну і звичайно, необхідних цілей.

Більшість методів вимірювання опору напівпровідникових матеріалів ґрунтуються на визначенні падіння напруги на деякій ділянці зразка, через який протікає електричний струм. При вимірюванні, на ділянці дотику металевого електрода та напівпровідника, при протіканні електричного струму, можуть виникати фізичні ефекти та явища, що при певних умовах вносять суттєву похибку в результати вимірювання. Найбільш важливими із них є [7]:

- інжекція неосновних носіїв заряду в точці дотику;
- високий перехідний опір контакту;
- ефект Пельтьє, що призводить до виникнення градієнту температури на дослідному зразку;
- нагрів зразка електричним струмом, що протікає через зразок.

Тобто, при вимірюванні параметрів компонентів, варто враховувати все вище перелічене, та намагатися звести вимірювання до таких умов, щоб вплив всіх цих явищ був мінімальний.

Найбільш простим методом визначення питомого опору є вимірювання опору зразка правильної геометричної форми із постійним поперечним перерізом. Але застосувати його в реальних умовах практично неможливо, через ряд складностей на зразок неможливості контролювати властивості матеріалу в будь-якій точці дослідного зразка [8]. Тому існують методи для визначення питомого опору, які застосовуються в залежності від необхідних цілей в кожному конкретному випадку.

Результати дослідження

Найпоширенішим способом вимірювання опору напівпровідникового матеріалу є використання чотириточкового колінеарного зонду. Ця техніка передбачає приведення чотирьох однаково розташованих зондів у контакт з матеріалом невідомого опору. Матриця зондів розміщена в центрі матеріалу, як показано на рисунку 1.

Два зовнішні щупи використовуються для джерела струму, а два внутрішні щупи - для вимірювання результуючого падіння напруги на поверхні зразка. Питомий опір розраховується наступним чином [7]:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V}{I} \cdot t \cdot k, \quad (1)$$

де ρ – питомий опір; V – напруга, що вимірюється; I – прикладений струм; t – товщина зразку; k – поправочний коефіцієнт на основі співвідношення зонду до діаметра пластини і на відношення товщини пластини до розрізу зонда.

Для деяких матеріалів, таких як тонкі плівки та покриття, натомість визначається опір листа або поверхневий опір, який не враховує товщину. Опір напівпровідникової пластини (σ) обчислюється наступним чином [8]:

$$\sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V}{I} \cdot k = 4.532 \cdot \frac{V}{I} \cdot k, \quad (2)$$

де σ – опір напівпровідникової пластини (Ом/квадрат, або просто Ом).

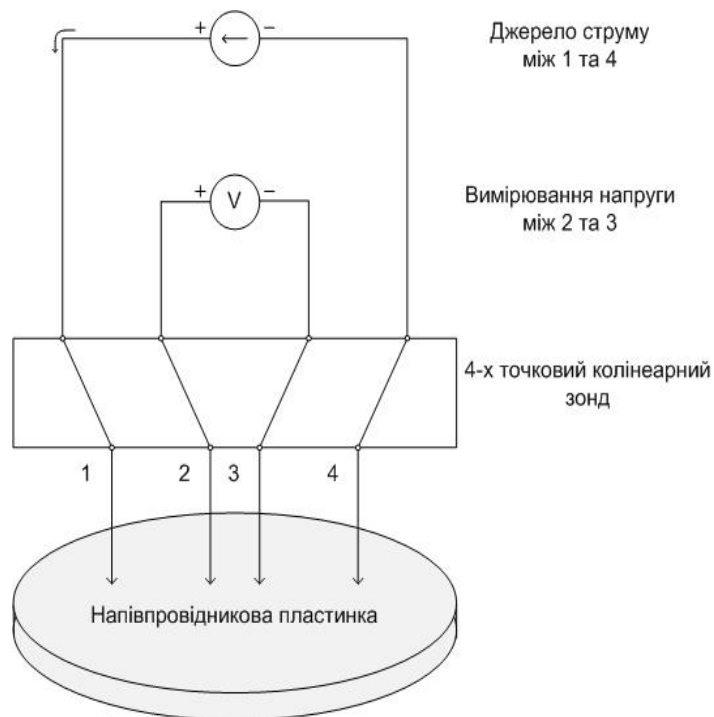


Рис. 1. Схема випробування питомого опору зонда

Необхідно звернути увагу, що одиниці опору напівпровідникової пластини виражаються в Ω / квадрат, на відміну від вимірюваного опору.

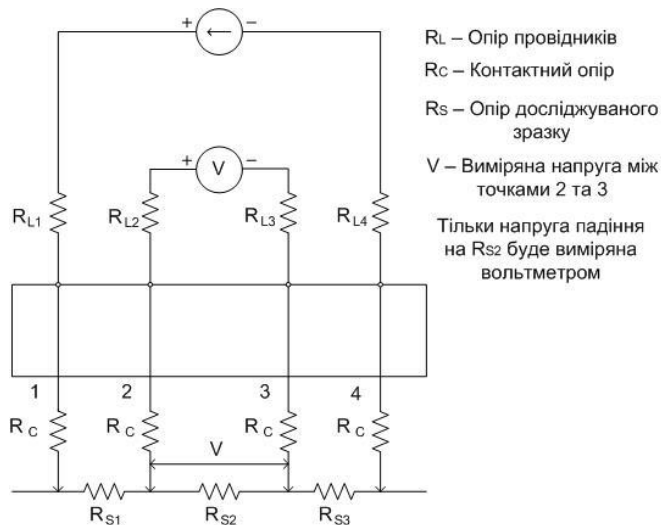


Рис. 2. Схема випробування питомого опору, що показує опори ланцюга

Використання чотирьох зондів усуває помилки вимірювання через опір зонда, опір розтікання під кожним зондом та контактний опір між кожним металевим зондом та напівпровідниковим матеріалом. На рис. 2 представлено ще одне зображення чотириточкового колінеарного зонда, який показує деякі опори ланцюга.

Таким чином R_L представляють опір випробувальних провідників і матеріалів. R_C являє собою контактний опір між металевим зондом і напівпровідниковим матеріалом. Контактний опір може бути в кілька сотень – тисячу разів вищим, ніж опір досліджуваного зразка матеріалу, який представлений R_C .

Необхідно звернути увагу на те, що струм протікає крізь усі опори першого та четвертого контактного з'єднання та зондів, а також через напівпровідниковий матеріал. Однак напруга вимірюється лише між щупами 2 і 3. Враховуючи, що між щупами 2 і 3

струм протікає лише через R_{S2} , вольтметром буде вимірюватися лише падіння напруги через R_{S2} . Усі інші опори, небажано введені R_L та контакту R_C не вимірюватимуться.

Двоточковий метод вимірювання питомого опору зазвичай застосовується для вимірювання зразків, що мають правильну геометричну форму та відомий поперечний переріз. Схема вимірювання питомого опору двоточковим зондом наведена на рис. 3 [9].

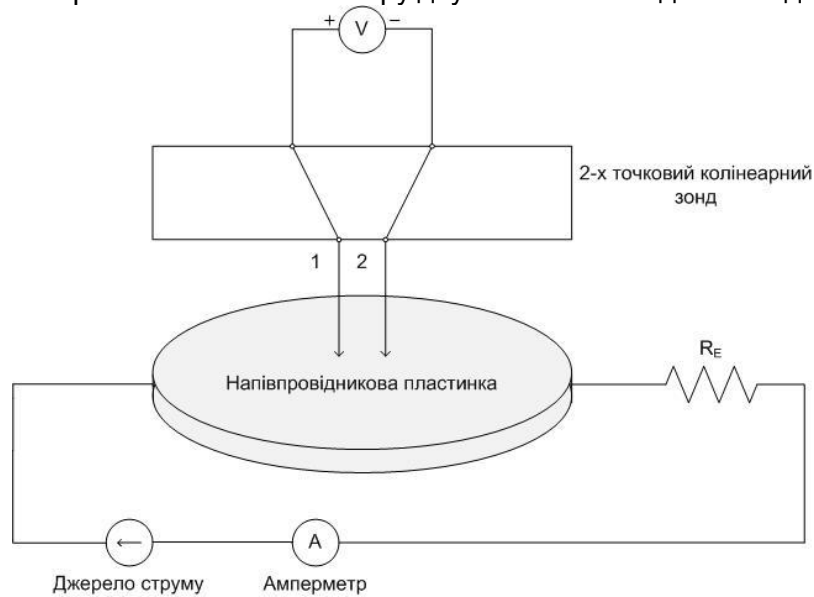


Рис. 3. Схема вимірювання питомого опору доточковим колінеарним зондом

Для вимірювання питомого опору дослідного зразка, наприклад у вигляді прямокутного бруска, на бокові грані наносять омичні контакти площею D . Через них пропускають електричний струм I , величину якого встановлюють по амперметру A .

На поверхні дослідного зразка розміщують два зонда (1 та 2) на відстані S , між якими вимірюється різниця потенціалів U . Якщо зразок однорідний, то його питомий опір буде дорівнювати [9]:

$$\rho = \frac{D}{S} \cdot \frac{U}{I}, \quad (3)$$

де ρ – питомий опір; U – різниця потенціалів між вимірювальними зондами; S – відстань між зондами; D – площа поперечного перерізу дослідного зразка; I – прикладений струм.

Еталонний опір R_E вводять в коло для більш точного вимірювання опору дослідного зразка $R_X = U_X / I$. Вимірюючи падіння напруги на еталонному опорі, можливо вимір R_X замінити наступним чином, так як $I = U_X / R_X = U_E / R_E$, а відповідно $U_X / U_E = R_X / R_E$, тоді

$$\rho = R_E \cdot \frac{U_X}{U_E} \cdot \frac{D}{S}. \quad (4)$$

Двоточковий метод максимально схожий по принципу вимірювання до чотири точкового, але вимагає набагато більше зусиль і затраченого часу, так як є необхідним виготовлення омичних контактів гарної якості, що вимагає електролітичної обробки самого зразка.

Задля зменшення похибки через великий опір між контактами необхідно застосовувати електронний вольтметр з високим вхідним опором або вносити в схему компенсуючий потенціометр.

Сумарна похибка, яку можна добитися застосовуючи двоточковий метод, при вимірюванні зразків правильної геометричної форми складає 1-3 %. А діапазон питомих опорів сягає $10^{-5} - 4 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Метод одноточкового колінеарного зонду зазвичай застосовується для виявлення мікронеоднорідностей в циліндричних злитках напівпровідників постійного перерізу (див. рис. 4) [11].

Через дослідний зразок із низькоомними контактами площею D пропускають електричний струм I , що контролюється амперметром. На поверхню зразка поміщають металевий зонд, та використовуючи вольтметр вимірюють його потенціал U по відношенню до одного з контактів, до яких прикладений струм.

Дослідний зонд послідовно переміщують від одного контакту до іншого, що дозволяє виміряти розподіл електричного потенціалу по злитку. Якщо зразок однорідний та величина питомого опору не залежить від координат, то різниця потенціалів між точками дослідного зразка, що розміщені на відстані ΔX , дорівнює [6]:

$$\Delta U = \frac{I}{D} \rho \Delta X, \quad (5)$$

$$\rho = \frac{D}{I} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta X}. \quad (6)$$

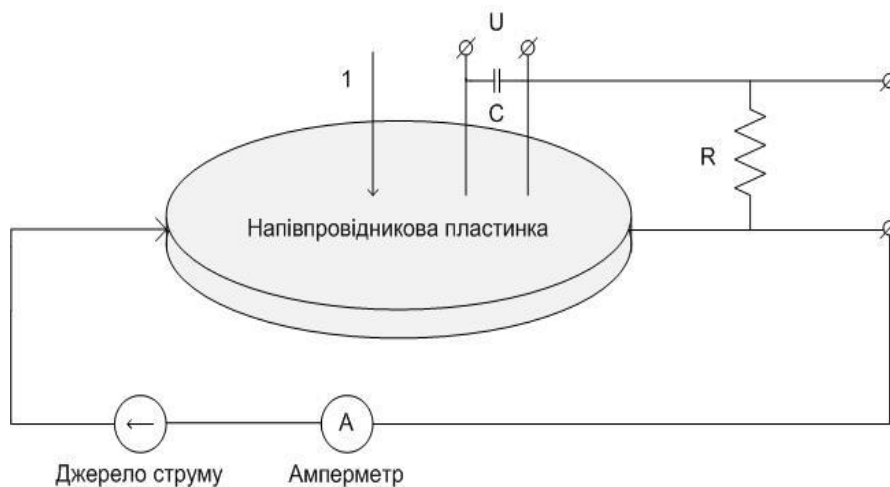


Рис. 4. Схематичне зображення методу одноточкового колінеарного зонду для вимірювання питомого опору

Питомий опір визначається за результатами вимірювань потенціалу в двох точках зразка.

Розглянемо двокаскадний мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом який запропонований авторами [12], він включає ємність, котушку індуктивності, вимірювач різниці частот, джерело живлення, а також рамку-тримач. Пристрій виконаний у вигляді двох каскадів, при цьому перший каскад містить два зонди, чотири резистори, ємність та два біполярних транзистори, третій та четвертий зонди з'єднані з першим та другим резисторами та загальною шиною, перше джерело живлення з'єднано з ємністю та котушкою індуктивності, які сполучені з загальною шиною, перший та другий біполярні транзистори з'єднані між собою, а також з третім та четвертим резисторами та з загальною шиною, другий каскад містить перший та другий зонди, які з'єднані з п'ятим та шостим резисторами та з загальною шиною, до другого джерела живлення під'єднана ємність та котушка індуктивності, крім того, третій та четвертий біполярні транзистори з'єднані між собою, а також з сьомим та восьмим резисторами та загальною шиною, яка разом зі стоком першого та третього біполярних транзисторів утворює вихід пристрою. Крім того вимірювач різниці частот підключений до першого та другого каскадів, а також з'єднаний з частотоміром, який встановлений з можливістю зв'язку з персональним комп'ютером.

На рис.5 представлена схема двокаскадного мікроелектронного чотиризондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом. В основу даного пристрою поставлено задачу створення двокаскадного мікроелектронного чотиризондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним

виходом, в якому за рахунок введення нових елементів, двох каскадів та зв'язків досягається можливість без перекалібровки проводити вимірювання у широкому діапазоні параметру з високою точністю. Поставлена задача вирішується тим, що двокаскадний мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом включає чотири зонди, два джерела живлення, вісім резисторів, чотири біполярних транзистори, дві ємності, дві котушки індуктивності.

Перший каскад містить третій та четвертий зонди, які з'єднані з першим та другим резисторами, відповідно, та загальною шиною. Перше джерело живлення з'єднано з ємністю та котушкою індуктивності, які з'єднані з загальною шиною. Перший біполярний транзистор та другий біполярні транзистори сполучені між собою, а також з третім та четвертим резисторами та загальною шиною.

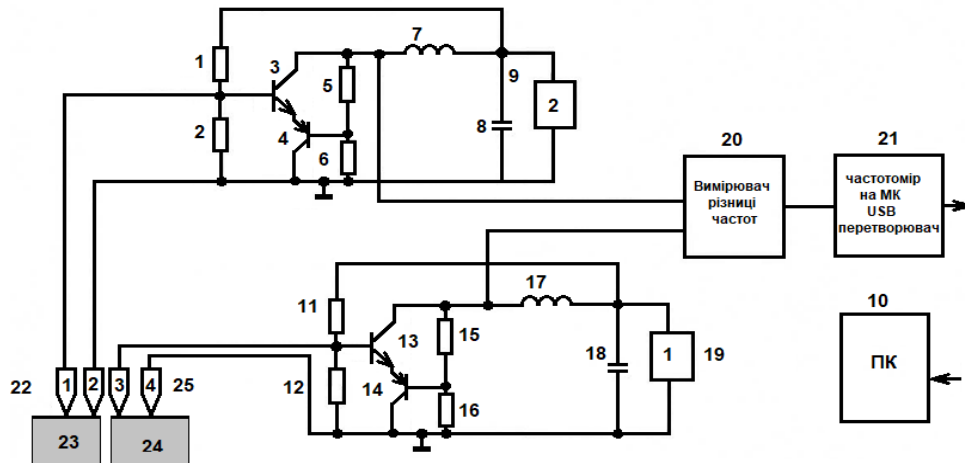


Рис. 5. Схема двокаскадного мікроелектронного чотиризондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом

Другий каскад містить перший та другий зонди, які з'єднані з п'ятим та шостим резисторами та загальною шиною. Друге джерело живлення сполучено з ємністю та котушкою індуктивності та загальною шиною.

Третій біполярний транзистор та четвертий біполярний транзистор з'єднані між собою, з сьомим та восьмим резисторами та загальною шиною, яка разом зі стоком першого та третього біполярних транзисторів утворює вихід пристрою. Вимірювач різниці частот підключений до першого та другого каскадів, а також сполучений з частотоміром, який встановлений з можливістю зв'язку з персональним комп'ютером.

Розглянемо ще один пристрій, який реалізує вимірювання опору напівпровідникового матеріалу шестизондовим методом. Авторами в роботі [13] запропонований двокаскадний мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом (див. рис.6), який включає ємність, котушку індуктивності, вимірювач різниці частот, джерело живлення, а також рамку - тримач, причому пристрій виконаний у вигляді двох каскадів, при цьому в перший каскад введено чотири зонди, друге джерело живлення, чотири резистори, ємність та два біполярних транзистори, причому третій та шостий зонди, з'єднані з першим джерелом живлення, четвертий та п'ятий зонди з'єднані з першим та другим резисторами та загальною шиною. Друге джерело живлення з'єднано з ємністю та котушкою індуктивності, які сполучені з загальною шиною, перший та другий біполярні транзистори з'єднані між собою, а також з третім та четвертим резисторами та з загальною шиною, а другий каскад містить перший та другий зонди. Які з'єднані з п'ятим та шостим резисторами та з загальною шиною, до якого підключені третє джерело живлення, яке з'єднано з ємністю та котушкою індуктивності, крім того, третій та четвертий біполярні транзистори з'єднані між собою, а також з сьомим та восьмим резисторами та загальною шиною, яка разом зі стоком першого та третього біполярних транзисторів утворює вихід пристрою, крім того вимірювач різниці частот підключений до першого та другого каскадів, а також з'єднаний з частотоміром, який встановлений з можливістю зв'язку з персональним комп'ютером.

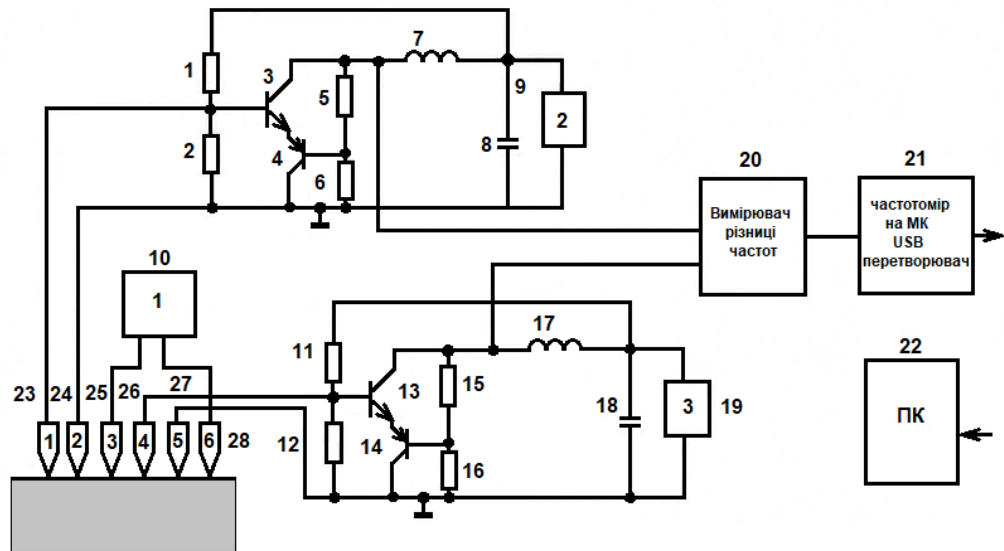


Рис.6. Схема двокаскадного мікроелектронного шестизондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом

В основу даного пристрою поставлено задачу створення двокаскадного мікроелектронного шестизондового пристрою для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом, в якому за рахунок введення нових елементів, двох каскадів та зв'язків досягається можливість без перекалібровки проводити вимірювання у широкому діапазоні параметру з високою точністю [13].

Перший каскад містить третій та шостий зонди, що з'єднані з першим джерелом живлення. Четвертий та п'ятий зонди з'єднані з першим та другим резисторами відповідно та загальною шиною. Друге джерело живлення з'єднано з ємністю та котушкою індуктивності, які з'єднані з загальною шиною. Перший біполярний транзистор та другий біполярні транзистори сполучені між собою, а також з третім та четвертим резисторами та загальною шиною.

Другий каскад містить перший та другий зонди, які з'єднані з п'ятим та шостим резисторами та загальною шиною. Третє джерело живлення сполучено з ємністю та котушкою індуктивності та загальною шиною. Третій біполярний транзистор та четвертий біполярний транзистор з'єднані між собою, з сьомим та восьмим резисторами та загальною шиною, яка разом зі стоком першого та третього біполярних транзисторів утворює вихід пристрою. Вимірювач різниці частот підключений до першого та другого каскадів а також сполучений з частотоміром, який встановлений з можливістю зв'язку з персональним комп'ютером.

Існують також інші методи вимірювання опору, серед яких є високоточні цифрові засоби вимірювання опорів – цифрові мости [14]. Але дані методи практично не використовуються в мікроелектронній та наноелектронній технології. Ці методи є прямими методами вимірювання опорів, але в досить вузькому діапазоні вимірювання опорів, тому для вимірювання параметрів напівпровідникових матеріалів практично не використовуються [15].

Висновки

Таким чином, наведені методи вимірювання опорів в напівпровідникових матеріалах здатні забезпечити необхідну точність вимірювань, не вносячи паразитних змін в параметри напівпровідника, що досліджується. Для ефективного дослідження необхідно обрати метод вимірювання в залежності від поставлених цілей, що задовольнить технічне завдання й відкриє можливості для досягнення необхідного результату. Одним із пристроїв який заснований на шестизондовому методі, який дає можливість без перекалібровки проводити вимірювання у широкому діапазоні параметру з високою точністю є двокаскадний мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом.

Література

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : «УНІВЕРСУМ-ВІННИЦЯ», : Вінниця, 1999. 275 с .
2. Фрейк, Д.М., Возняк О.М., Чобанюк В.М. Локалізовані стани у напівпровідниках: теоретичні аспекти розрахунку : ФХТТ 2010. Т. 11, № 4. С. 797-803.
3. Henini, M. A., Tuck B., Paull S.E. Microcomputer-based deep level transient spectroscopy (DLTS) system SCI. INSTRUM., VOL. 18, 1985. P.927-929.
4. Seredyuk, B.O. Analysis of the electrical, magnetic and structural properties of A3B6 type layered semiconductor crystals intercalated with metals with reference to their military applications : Military-technical book. 2018, № 19. PP. 39 - 43.
5. Lukiyanets, B.A., Matulka D.V., Grygorchak I.I. Electronic spectrum of intercalated layered crystals: model analysis Journal of nano- and electronic physics. 2018, № 10 (6),
6. Свистова, Т.В. Методы исследования материалов и структур электроники, учебное пособие : Воронеж, 2013, 225 с.
7. Воробьев, Ю.В., Добровольский В. Н., Стриха В. И. Методы исследования полупроводников : К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. 232 с.
8. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур : М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
9. Павлов, Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов : М.: Высшая школа, 1987. 239 с.
10. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов : А.И. Лебедев. М.: Физматлит, 2008. 488 с.
11. Sze, S.M. Physics of Semiconductor Devices : New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. 2007. 763 p.
12. Пат. 98569 Україна, МПК H01L 21/66, G01R 31/26. Двокаскадний мікроелектронний чотиризондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом : О. В. Осадчук, Ю. І. Нікешин, Я. О. Осадчук, О. П.Червак (Україна). № u201413752 ; заявл. 22.12.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. 5 с.: іл.
13. Пат. 100436 Україна, МПК H01L 21/66, G01R 31/26. Двокаскадний мікроелектронний шестизондовий пристрій для вимірювання напівпровідникового опору з частотним виходом : О. В. Осадчук, Ю. І. Нікешин, Я. О. Осадчук, О. П. Червак (Україна). № u201500981; заявл. 09.02.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 6 с.: іл.
14. Гриневич, Ф. Б., Монастирський З. Я., Мельник В. Г., Левицький А. С. Покращення метрологічних характеристик сенсорних вимірювальних систем : Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2013. Вип. 35. С. 48-57. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2013_35_8
15. Гриневич, Ф. Б. Апаратно-програмні засоби вимірювання електричних та неелектричних величин і їх метрологічне забезпечення : Ф.Б. Гриневич, З.Я. Монастирський, А.І. Новік, та інш.// Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2009. Вип 23. С. 39-47.

References

1. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V. Reaktivni vlastivosti tranzistoriv i tranzistornih shem : «UNIVERSUM-VINNICYa», : Vinnicya, 1999. 275 s .
2. Freyik, D.M., Voznyak O.M., Chobanyuk V.M. Lokalizovani stani u napivprovidnikah: teoretichni aspekti rozrahunku : FHTT 2010. T. 11, № 4. S. 797 803.
3. Henini, M. A., Tuck B., Paull S.E. Microcomputer-based deep level transient spectroscopy (DLTS) system SCI. INSTRUM., VOL. 18, 1985. P.927 929.
4. Seredyuk, B.O. Analysis of the electrical, magnetic and structural properties of A3B6 type layered semiconductor crystals intercalated with metals with reference to their military applications : Military-technical book. 2018, № 19. PP. 39 - 43.
5. Lukiyanets, B.A., Matulka D.V., Grygorchak I.I. Electronic spectrum of intercalated layered crystals: model analysis Journal of nano- and electronic physics. 2018, № 10 (6), 06007. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(6\).06007](https://doi.org/10.21272/jnep.10(6).06007).
6. Svistova, T.V. Metody issledovaniya materialov i struktur elektroniki, uchebnoe posobie : Voronezh, 2013, 225 s.
7. Vorobev, Yu.V., Dobrovolskij V. N., Striha V. I. Metody issledovaniya poluprovodnikov : K.: Vysha shk. Golovnoe izd-vo, 1988. 232 s.
8. Batavin V.V., Koncevoj Yu.A., Fedorovich Yu.V. Izmerenie parametrov poluprovodnikovyh materialov i struktur : M.: Radio i svyaz, 1985. 264 s.
9. Pavlov, L.P. Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovyh materialov : M.: Vysshaya shkola, 1987. 239 s.
10. Lebedev, A.I. Fizika poluprovodnikovyh priborov : A.I. Lebedev. M.: Fizmatlit, 2008. 488 s.
11. Sze, S.M. Physics of Semiconductor Devices : New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. 2007. 763 p.
12. Pat. 98569 Ukrayina, MPK H01L 21/66, G01R 31/26. Dvokaskadnij mikroelettronnij chotirizondovij pristirij dlya vimiryuvannya napivprovidnikovogo oporu z chastotnim vihomom : O. V. Osadchuk, Yu. I. Nikeshin, Ya. O. Osadchuk, O. P.Chervak (Ukrayina). № u201413752 ; zayavl. 22.12.2014 ; opubl. 27.04.2015, Byul. № 8. 5 s.: il.
13. Pat. 100436 Ukrayina, MPK H01L 21/66, G01R 31/26. Dvokaskadnij mikroelettronnij shestizondovij pristirij dlya vimiryuvannya napivprovidnikovogo oporu z chastotnim vihomom : O. V. Osadchuk, Yu. I. Nikeshin, Ya. O. Osadchuk, O. P. Chervak (Ukrayina). № u201500981; zayavl. 09.02.2015; opubl. 27.07.2015, Byul. № 14. 6 s.: il.

14. Grinevich, F. B., Monastirskij Z. Ya., Melnik V. G., Levickij A. S. Pokrashennya metrologichnih karakteristik sensornih vimiryuvalnih sistem : Praci Institutu elektrodinamiki Nacionalnoyi akademiyi nauk Ukrayini. 2013. Vip. 35. S. 48 57. Rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2013_35_8
15. Grinevich, F. B. Aparatno-programni zasobi vimiryuvannya elektrichnih ta neelektrichnih velichin i yih metrologichne zabezpechennya : F.B. Grinevich, Z.Ya. Monastirskij, A.I. Novik, ta insh.// Praci Institutu elektrodinamiki Nacionalnoyi akademiyi nauk Ukrayini: Zb. nauk. pr. K.: IED NANU, 2009. Vip 23. S. 39 47.