

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Підлягає поверненню на кафедру

Перетворювачі та пристрої виміральної техніки

Методичні рекомендації до лабораторного практикуму



Чернівці
Чернівецький національний університет
2021

УДК 621.317 (076.5)
П272

К 63 Архелюк О.Д., Перетворювачі та пристрої вимірювальної техніки: метод. реком. до лабор. практикуму. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2021. – 37 с.

У методичній розробці наведено роботи лабораторного практикуму з предмета «Перетворювачі та пристрої вимірювальної техніки». Зміст робіт охоплює основні розділи курсу.

Для студентів технічних факультетів за спеціальністю «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

**УДК 621.317 (076.5)
П272**

© Чернівецький національний
університет, 2021

ЗМІСТ

ЛР 1. Вивчення будови та роботи лазерного діода, як перетворювача електричного сигналу в оптичний сигнал	4
ЛР 2. Вимірювання потужності в діапазоні НВЧ за допомогою напівпровідникового термоопору	9
ЛР 3. Вимірювання температури напівпровідниковими термометрами	11
ЛР 4. Вивчення будови, роботи та калібрування термоопору СТ-1	20
ЛР 5. Вивчення будови та роботи п'єзоелектричного перетворювача	23
ЛР 6. Вивчення термомостової схеми вимірювання потужності	25
Список рекомендованої літератури	38

Лабораторна робота 1

Вивчення будови та роботи лазерного діода, як перетворювача електричного сигналу в оптичний сигнал

Мета роботи: Дослідити характеристики напівпровідникових лазерів.

Об'єкт дослідження: Напівпровідникові лазери на гетеропереходах

Завдання, які вирішуються в роботі:

1. Експериментально виміряти ват-амперні характеристики лазерного діода.
2. Експериментально визначити струм накачування, відповідного початку генерації оптичного випромінювання і порогового струму лазерного діода.

1. Теоретична частина

Напівпровідниковий лазер - лазер, активним середовищем якого є напівпровідниковий кристал, а точніше, область рп переходу.

У напівпровідникової активному середовищі можна досягти великого оптичного посилення, що обумовлює можливість використання активних елементів малих розмірів (довжина резонатора 50 мкм - 1 мм) і забезпечує компактність таких лазерів. Крім компактності, напівпровідникові лазери мають високий ККД (до 50%). А великий вибір сучасних напівпровідникових матеріалів забезпечує генерацію в широкому спектральному діапазоні (від 0,3 мкм до 30 мкм). Ці якості напівпровідникових лазерів забезпечили широке застосування в різних областях сучасної діяльності людини. Для роботи лазера будь-якого типу необхідно виконання таких основних вимог: 1) створення інверсної заселеності на одному з оптичних переходів; 2) перевищення посилення над втратами; 3) наявність резонатора для забезпечення позитивного зворотного зв'язку. На відміну від лазерів інших типів, в напівпровідникових лазерах використовуються випромінювальні квантові переходи між дозволеними енергетичними зонами, а не між дискретними рівнями енергії. Інверсна населеність створюється за допомогою інжекції через рп перехід нерівноважних носіїв струму, шляхом застосування зовнішнього напруги в прямому напрямку. Справа в тому, що розподіл електронів по можливим енергетичним рівням в напівпровідниках залежить від концентрації домішки і температури кристала. При цьому для кожної температури існує цілком певний розподіл електронів по енергетичним станам. При зміні температури через деякий час встановлюється рівновага електронів і атомів і відбувається новий розподіл електронів по енергетичним рівням. При цьому частина електронів може мати енергію, достатню, щоб перейти в зону провідності і стати вільними

носіями струму. Ці вільні носії, існуючі при тепловій рівновазі, називаються рівноважними носіями струму.

інших процесів, наприклад, шляхом висвітлення напівпровідника або шляхом застосування електричного поля, то протягом щодо тривалого часу електрони можуть мати температуру, більшою, ніж температура атомів, що призводить до збільшення електропровідності, і такі електрони (і дірки) називаються нерівноважними носіями струму. Поряд з генерацією нерівноважних носіїв існує зворотний процес - рекомбінація електронів і дірок - перехід електронів із зони провідності в валентну зону, в результаті чого відбувається зникнення електронів і дірок. Рекомбінація може супроводжуватися випромінюванням фотонів, що і лежить в основі роботи напівпровідникових лазерів.

На рис.1.1. (Див. «Вступ») представлено положення рівня Фермі в власному і домішковому напівпровідниках. Одне з важливих властивостей рівня Фермі полягає в тому, що в системі, що складається з напівпровідників *n*- і *p*-типу і якщо до них не докладено напруга, рівні Фермі (F_n і F_p) у них вирівнюються (рис.1.1а). А якщо вони знаходяться під різними потенціалами, то рівні Фермі в них зсуваються на величину різниці потенціалів (рис.1.1б).

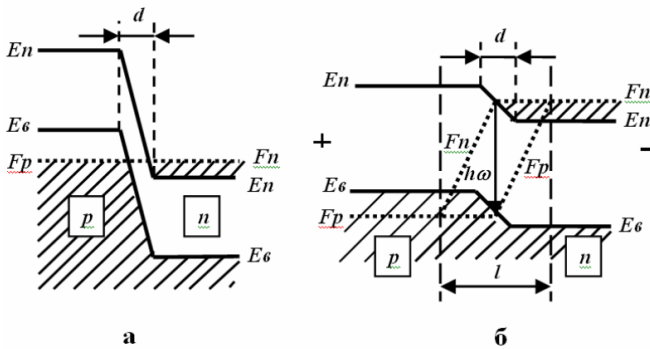


Рис.1.1. Енергетична діаграма інжекційного напівпровідникового лазера: *pn* перехід без прикладеної зовнішньої напруги (а); *pn* перехід при додатку зовнішньої напруги в прямому напрямку (б). *d* - ширина *pn* переходу, *l* - реальна ширина області, що забезпечує роботу лазера.

В цьому випадку в зоні *pn* переходу створюється інверсна заселеність і електрони здійснюють перехід із зони провідності в валентну зону (рекомбнують з дірками). При цьому випускаються фотони з енергією

$h\nu$. За таким принципом працює світлодіод. Якщо для цих фотонів створити зворотний позитивний зв'язок у вигляді оптичного резонатора, то в області рп переходу при великих значеннях зовнішнього прикладеної напруги можна отримати лазерну генерацію. При малих значеннях зовнішнього прикладеної напруги процес освіти і рекомбінації нерівноважних носіїв відбувається хаотично і випромінювання має малу потужність і є некогерентним і немонохроматичним. Це відповідає світлодіодному режиму роботи напівпровідникового випромінювача. При збільшенні струму вище порогового значення випромінювання стає когерентним, його спектральна ширина сильно звужується, а інтенсивність різко зростає - починається лазерний режим роботи напівпровідникового випромінювача. При цьому також збільшується ступінь лінійної поляризації генерованого випромінювання.

На рис.1.2 схематично представлена конструкція напівпровідникового лазера і розподіл інтенсивності вихідного випромінювання. Як правило, в такому лазері резонатор створюється поліруванням двох діаметрально протилежних сторін кристала, перпендикулярних площині рп переходу. Ці площини робляться паралельними і поліруються з високим ступенем точності. Вихідну поверхню можна розглядати як щілину, через яке проходить випромінювання. Кутова розбіжність випромінювання лазера визначається дифракцією випромінювання на цій щілині. При товщині рп переходу в 20 мкм і шириною - 120 мкм, кутова розбіжність відповідає приблизно 60 в площині XZ і 10 - в площині YZ.

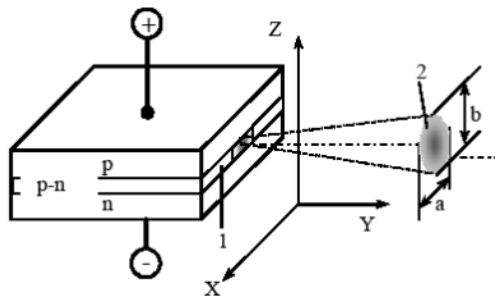


Рис.1.2. Принципова схема лазера на рп переході. 1-область рп переходу (активний шар); 2-перетин лазерного пучка в площині XY

В сучасних напівпровідникових лазерах широко використовуються так звані напівпровідникові гетероструктури, в розробку яких значний внесок

зробив академік Ж. І. Алфьоров (Нобелівська премія 2000 року). Лазери на основі гетероструктур володіють кращими характеристиками, наприклад, більшою вихідною потужністю і меншою розбіжністю. Приклад подвійної гетероструктури наведено на рис.3, а її енергетична схема - на рис. 4.

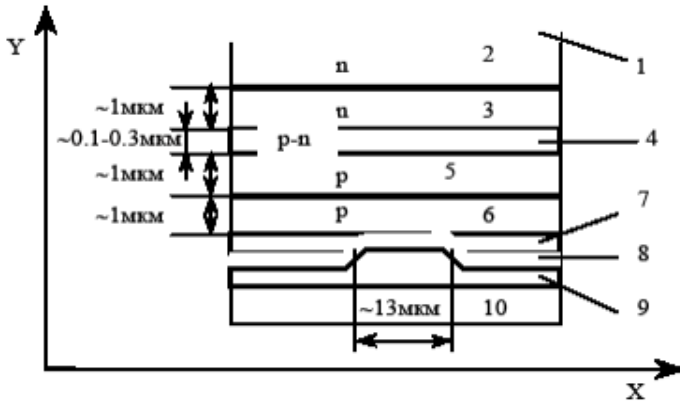


Рис.1.3. Напівпровідникова подвійна гетероструктура. 1- який проводить металізований шар для створення електричного контакту; 2 - шар GaAs (n); 3 - шар Al_{0.3}Ga_{0.7}As (n); 4 - шар, відповідний зоні інжекції носіїв заряду (pn-перехід); 5 - шар Al_{0.3}Ga_{0.7}As (p); 6 - шар GaAs (p); 7 - непровідний шар оксиду металу для обмеження струму через pn-перехід, який формує зону генерації випромінювання; 8,9 - прилеглі шари для створення електричного контакту; 10 – підкладка з тепловідвідом

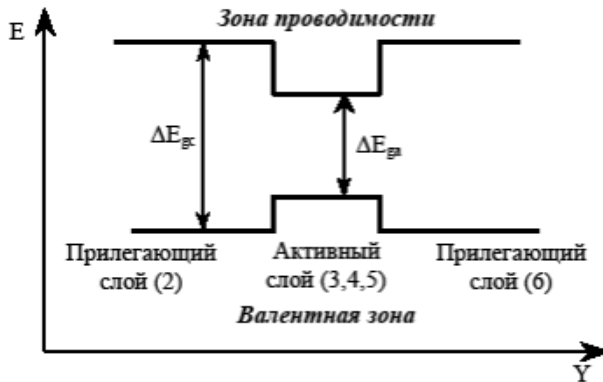


Рис. 1.4. Енергетична схема подвійної гетероструктури, вісь Y і номери шарів відповідають рис.3. $\Delta E_{\epsilon r}$ - ширина забороненої зони; $\Delta E_{\epsilon p}$ - ширина забороненої зони pn-переходу.

1. Опис обладнання

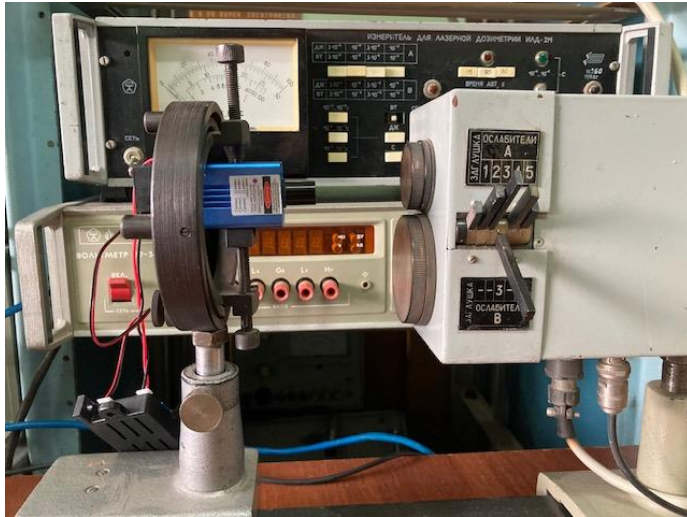


Рис. 1.5. Вимірювач для лазерної дозиметрії ИЛД-2М

Призначений для вимірювання енергетичних і часових параметрів лазерного випромінювання в спектральному діапазоні 0,49 - 1,15 мкм і на довжині хвилі 10,6 мкм з метою визначення ступеня небезпеки випромінювання для людини.

Діапазон вимірів:

- енергії імпульсів випромінювання 0,0000001 ... 1 Дж (0,49 ... 1,15 мкм) і 0,000001 ... 102 Дж (10,6 мкм)
- потужності випромінювання 0,000001 ... 10 Вт (0,49 ... 1,15 мкм) і 0,0001 ... 0,1 Вт (10,6 мкм)

Межа основної похибки:

- при вимірюванні енергетичних параметрів випромінювання $\pm 20\%$ (0,49 ... 1,15 мкм) і $\pm 25\%$ (10,6 мкм)
- в режимі вимірювання тривалості імпульсів $\pm 30\%$ (0,49 ... 1,15 мкм)

Діапазон значень тривалості імпульсів випромінювання при вимірюванні енергії

0,0000001 ... 0,01 С (0,49 ... 1,15 мкм) і 0,000001 ... 0,01 С (10,6 мкм).

Граничне значення частоти повторення імпульсів випромінювання при вимірюванні енергії 500 Гц (0,49 ... 1,15 мкм) і 25 Гц (10,6 мкм).

2. Порядок виконання роботи

- 2.1. Перевірити комутацію установки.
- 2.2. Ввімкнути прилади.
- 2.3. Задати рівень сигналу з генератора ГЗ-114 за допомогою атенюатора, контролюючи струм за допомогою ампервольтметра В7-21 при початковому значенні 1 мА.
- 2.4. Провести замір потужності сигналу на виході лазерного діода, за допомогою ИЛД-2М.
- 2.5. Провести вимірювання ват-амперної характеристики лазерного діода, змінюючи струм в інтервалі 1-50 мА, з кроком 1 мА.
- 2.6. Побудувати графік ват-амперної залежності.
- 2.7. Віднайти по графіку значення струму, при якому лазерний діод переходить в режим лазерного випромінювання, та пояснити.

Завдання

1. Виміряти ват-амперну характеристику лазерного діода, дані занести в таблицю
2. Зміна струму накачування перевірити через 0,2 мА. За вимірним значенням побудувати залежність оптичної потужності P від струму накачування I_n . За побудованими залежностями визначити:
 - значення струму накачування ЛД, відповідне початку генерації;
 - значення порогового струму I_n , відповідне зламу ват-амперної характеристики лазерного діода.

3. Контрольні питання

1. Обґрунтувати принципи роботи напівпровідникового лазера.
2. Енергетична діаграма інжекційного напівпровідникового лазера.
3. Принципова схема лазера на рп переході.
4. Напівпровідникова подвійна гетероструктура.
5. Енергетична схема подвійної гетероструктури.
6. Поясніть графік ват-амперної залежності.
7. Поясніть по графіку значення струму, при якому лазерний діод переходить в режим лазерного випромінювання.

Лабораторна робота № 2

Вимірювання потужності в діапазоні НВЧ за допомогою напівпровідникового термоопору

Мета роботи: ознайомлення з особливостями виміру середньої та імпульсної потужності в діапазоні НВЧ, придбання навичок роботи з термоелектричним ватметром і детекторною головкою, освоєння процедур пов'язаних з калібруванням детекторної головки.

Порядок виконання роботи

1. Керуючись "Технічним описом та інструкцією по експлуатації" підготувати до роботи ватметр поглинаєтья потужності МЗ-51 (рис.2.1) і генератор сигналів високочастотний Г4-79 (рис. 2.2).
- 2.



Рис. 2.1. Ватметр поглинаючої потужності МЗ-51: а) - блок ватметра вимірювальний Я2М-66, б) - перетворювач вимірювальний термоелектричний 4.681.467



Рис. 2.2. Генератор сигналів високочастотний Г4-79

2. Провести калібрування ватметра.
3. За допомогою детекторної головки провести вимірювання значення потужності в діапазоні частот 1780-2560 МГц з кроком 20 МГц, при трьох рівнях сигналів: - 25 дБ, -30 дБ, -35 дБ. Запропонувати спосіб вимірювання

середнього значення потужності. Побудувати ват-частотну характеристику генератора.

Контрольні питання

1. Розкажіть про класифікацію ватметрів:
 - а) за способом включення в передавальний тракт,
 - б) за характером вимірюваної потужності,
 - в) за рівнем середніх вимірюваних потужностей,
 - г) за видом використовуваних перетворювачів.
2. Поясніть роботу калориметричного вимірювача потужності.
3. Пояснити роботу термоелектричного вимірювача потужності.
4. Що таке термистор?
6. Чому термистор розташовується в приймальному перетворювачі на відстані від $\lambda / 4$ короткозамкнутого кінця?
8. У чому полягає основна похибка вимірювання потужності каліброваною детекторною головкою?

Література

1. Билько М. И., и др. Измерение мощности на СВЧ / М. И. Билько, А. К. Томашевский, П. П. Шаров, Е. А. Баймуратов, М., 1976.
2. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. М., 1960.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М., 1970.
4. Милованов О. С., Собенин Н. П. Техника сверхвысоких частот. М., 1980.
5. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. М., 1973

Лабораторна робота №3

Вимірювання температури напівпровідниковими термометрами

Теоретична частина

У молекулярно-кінетичній теорії під температурою розуміють рівень середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул при рівноважному стані системи. Поняття температури застосовується, в такий спосіб, лише масиву молекул, тому температура є макроскопічним параметром стану речовини.

Методи та засоби вимірювання температури

Температура не є вимірюваною величиною; її значення визначають за температурною зміною будь-якого зручного виміру фізичного параметра термометричної речовини (термометричного тіла). Вибраний термометричний параметр повинен суттєво, безперервно, однозначно та, бажано, лінійно залежати від температури; вимірювання величини

параметра не повинне вносити значних змін у температурний режим вимірюваного середовища.

Сучасна термометрія має у своєму розпорядженні різноманітні методи вимірювань, кожен з яких специфічний і не універсальний. Методи вимірювань температури поділяють на контактні (засіб вимірювання, що безпосередньо стикається з контрольованим об'єктом) і безконтактні (зручні вимірювання високих температур). Найбільш доступні, точні та надійні контактні методи, що реалізуються за допомогою термометрів.

Найбільш уживаними термометричними параметрами є:

Об'єм тіла. Залежність об'єму температури використовується у рідинних та газових термометрах. Як термометрична речовина в газових термометрах застосовують розріджений газ, близький за своїми властивостями до ідеального, а в рідинних – такі рідини, як ртуть, підфарбований спирт, толуол;

Електричний опір; використовується в термометрах опору, термометричним тілом є провідники – терморезистори та напівпровідники – термістори;

ТермоЕРС. Термометричним тілом при цьому є термопара - два різні провідники з великою різницею в роботі виходу електронів, з'єднані зварюванням або пайкою;

Лінійні розміри тел. Приклад – біметалічний термометр. Термометричним тілом є дві пластинки з металів з різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення, накладені одна на одну та скріплені разом. При зміні температури біметалічні платівки згинаються або закручуються, при цьому величина деформації залежить від температури;

Спектр випромінювання (енергетична світність, спектральний склад) використовується у радіаційному, яскравому та кольоровому пірометрах.

Застосовуються також інші параметри, що використовуються в манометричних, магнітних, п'єзо-кварцових та інших термометрах.

Термометричне тіло і середовище в процесі вимірювання повинні дійти стану теплової рівноваги, тому дуже важливо, щоб теплова «інерційність» вимірювального приладу була незначною, а власна теплоємність – мінімальною, щоб він не вніс спотворень у стан середовища.

Кожен вид термометрів може застосовуватися у певному температурному діапазоні та має свої переваги та недоліки.

Газові термометри використовують пряму пропорційну залежність між тиском ідеального газу та його абсолютною температурою при постійному обсязі (закон Шарля). Їх застосовують при невеликих тисках і досить високих температурах як еталонні, ними градуують і перевіряють інші

термометри. Нестача газових термометрів – вони громіздкі та незручні у використанні.

Рідкі термометри зручні у використанні, але діапазон їх роботи обмежений температурами кристалізації та кипіння рідини. До їх недоліків можна віднести нелінійність температурної залежності обсягів, що робить необхідним калібрування їх за газовими термометрами. Вони відрізняються інерційністю, великою власною теплоємністю та великими розмірами робочої частини.

Термопари мають великий діапазон температур, що вимірюються – від наднизьких до точки плавлення металів, з яких вони виготовлені. З їхньою допомогою можна вимірювати температуру в інтервалі від -269°C до 2300°C , використовуючи різні комбінації металів. До переваг термопарів відносяться малі розміри термометричного тіла, мала інерційність та теплоємність, можливість дистанційних вимірювань. Їх недоліки – нелінійність залежності термоЕРС від температури, відносно низька стабільність та невелика чутливість.

Термометри опору металів можуть вимірювати температуру в широкому діапазоні, наприклад, дротяна спіраль з платини дозволяє проводити вимірювання від -258°C до 900°C . Їхні переваги — мініатюрність, хороша лінійність характеристик, висока стабільність. До недоліків слід віднести низьку чутливість (опір металів зростає із підвищенням температури зі швидкістю $0.4\text{--}0.6\%/K$) та відносно велику інерційність.

Напівпровідникові термометри опору володіють високою чутливістю (у 8 – 10 разів більше, ніж у металевих термометрів опору), малою інерційністю, малими розмірами та високою стабільністю. Їхнім недоліком у порівнянні з термометрами опору з металів є нелінійність температурної залежності.

Температурні шкали

Вибравши термометричну речовину та параметр, необхідно задати початкову точку відліку та одиницю вимірювання температури. Хоча температура за фізичним змістом є мірою енергії, історично вона вимірюється у зручніших безрозмірних одиницях – градусах¹. У температурній шкалі зазвичай фіксують дві основні температури (реперні точки), відстань між якими називається основним температурним інтервалом шкали. Як реперні точки часто використовують температури кипіння і плавлення хімічно чистих речовин. Розмір одиничного інтервалу (одиниці температури) встановлюють як певну частку основного інтервалу.

В даний час застосовуються кілька температурних шкал, що відрізняються вибором реперних точок. У шкалі Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) інтервал між точкою плавлення льоду (приймається за температурний нуль) та точкою кипіння води при нормальному тиску ділиться на сто рівних часток – градусів Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). У шкалі Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) історично нуль визначався за точкою замерзання суміші води, льоду та нашатиру (1:1:1), а за 96°F було прийнято нормальну температуру людського тіла. Зараз точку танення льоду прийнято точно за $+32^{\circ}\text{F}$, а точку кипіння води – за $+212^{\circ}\text{F}$ (при нормальному атмосферному тиску). Один градус Фаренгейта дорівнює $1/180$ різниці цих температур.

У фізиці найбільш уживаною є термодинамічна (абсолютна) шкала температур (шкала Кельвіна), що базується на другому початку термодинаміки. Вона має одну реперну точку – потрійну точку води, якій присвоєно значення $T_{\text{тр}} = 273,16 \text{ К}$. Температури за шкалою Кельвіна відраховуються від абсолютного нуля температур, у якому немає будь-якого теплового руху молекул. Шкала Кельвіна стала основою міжнародного стандарту сучасної термометрії. Позитивні якості шкали – незалежність від властивостей термометричного речовини і висока точність відтворення потрійної точки $T_{\text{тр}}$. Співвідношення між температурами, вираженими за шкалою Цельсія та абсолютною термодинамічною шкалою:

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273,15 \text{ К},$$

при цьому 1°C дорівнює 1К .

У цій лабораторній роботі вивчаються фізичні основи вимірювання температури за допомогою напівпровідникових термометрів: напівпровідникового діода та терморезистора.

Методи вимірювання температури за допомогою діодних датчиків

Метод 1. Розглянутий зв'язок V і I дозволяє безпосередньо визначити абсолютну температуру T , вимірявши вольтамперну характеристику напівпровідникового діода. Зі співвідношень (3), (4) випливає:

$$I - I_{\text{нас}} = I_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon_g}{kT} + \frac{eV}{kT}\right). \quad (1)$$

Зазвичай у p - n -переходах прямий струм може бути на багато порядків більше струму насичення $I_{\text{нас}}$ (наприклад, у малопотужних кремнієвих діодах $I_{\text{нас}} \sim 10^{-9}\text{А}$, $I \sim 10^{-1}\text{А}$). У такому разі в лівій частині співвідношення (3) можна знехтувати $I_{\text{нас}}$. Тоді $\ln I$ буде лінійною функцією напруги

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{\varepsilon_g}{kT} + \frac{e}{kT} V.$$

Побудувавши експериментальний графік залежності $\ln I = f(V)$ для прямого струму, можна знайти кутовий коефіцієнт нахилу графіка

$$M = \frac{d \ln I}{dV} = \frac{e}{kT},$$

звідки визначається температура T :

$$T = \frac{e}{kM}. \quad (2)$$

Даний метод є одним з небагатьох, що дозволяє виміряти абсолютну температуру без попереднього градування термометра, проте практично він не застосовується через його трудомісткість.

Метод 2 вимірювання температури може бути реалізований при використанні рп переходу в режимі постійного струму при прямому включенні. З формули (1) в тому ж наближенні $I \gg I_{\text{нас}}$ слід, що при $I = \text{const}$ напруга на діоді V є лінійною функцією температури T і може бути зручним термометричним параметром:

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{I}{I_0} + \frac{\varepsilon_g}{e} = AT + B, \quad (3)$$

де константи A та B не залежать від температури. Константа A негативна, тому що опір напівпровідника зменшується зі зростанням температури і, отже, при постійному струмі напруга на зразку також зменшується. Оскільки значення I_0 і ε_g заздалегідь не відомі, то коефіцієнти A і B повинні визначатися емпірично при градування датчика і потім можуть бути використані для вимірювання температури. Константа дозволяє також знайти ε_g – ширину забороненої зони напівпровідника.

Як датчик температури в напівпровідникових термометрах зазвичай використовуються кремнієві або германієві діоди.

Вимірювання температури напівпровідниковими резистивними датчиками

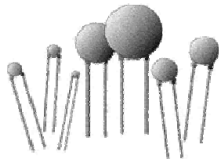


Рис. 3.1. Пример дисковых термисторов

Іншими датчиками температури можуть бути спеціальні напівпровідникові опори – терморезистори, або термістори. Вони зазвичай виготовляються з напівпровідникових окислів TiO_2 , MgO та інших речовин

(наприклад, ВаТіО3) з сильною залежністю опору від температури. Терморезистори мають великий температурний коефіцієнт опору:

$$\alpha = -\frac{1}{R} \frac{dR}{dT},$$

де R - Опір резистора. Коефіцієнт може досягати величин порядку 0,05-0,1 К-1 (що в десятки разів більше за цей коефіцієнт у металів). Перевагою термісторів є простота пристрою, різноманітність форм и мініатюрність, можливість працювати при значительних механічних навантаженнях, стабільність характеристик во времени. Терморезистори виготовляються в формі стержней, трубок, дисків, шайб, бусинок и тонких пластинок переважно методами порошкової металургії. Їх розміри можуть варіюватися в межах від 1-10 мкм до 1-2 см (рис.1).

Недоліком таких термометрів є нелінійна залежність їхнього опору від температури, яка приблизно описується співвідношенням:

$$R = R_0 \exp\left(C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right),$$

де C – константа, T і T₀ – температури у градусах Кельвіна, R та R₀ – опору термістора при температурах T та T₀ відповідно.

Терморезисторні термометри вимагають попереднього градування.

Напівпровідникові термометри знайшли широке застосування завдяки їхній високій точності, компактності, малій тепловій інертності, зручності застосування у схемах.

Експериментальна частина

Обладнання: напівпровідниковий діод, терморезистор, амперметр, цифровий вольтметр, джерело постійної регульованої напруги, омметр, нагрівач зі своїм джерелом живлення, рідинний термометр. У роботі використовуються два види напівпровідникових датчиків температури: діод з p-n-переходом та терморезистор.

Експериментальна установка

Блок-схема наведена на рис.3.2.

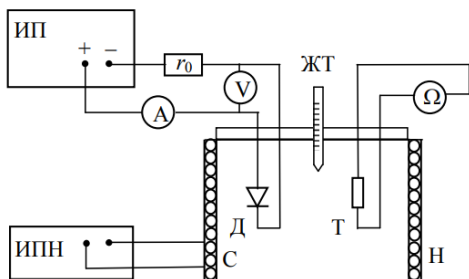


Рис.3.2. Експериментальна установка

Термодатчики, що вивчаються (Д – кремнієвий діод Д-814 і Т – терморезистор типу Т8Р) поміщені в латунну капсулу С, заповнену гліцерином, який збільшує теплообмін зі стінками капсули. На капсулу намотаний спіральний нагрівач Н, підключений до незалежного джерела напруги ІСН. Одночасно в капсулу з гліцерином поміщений рідкий кістковий термометр ЖТ, за показаннями якого можна незалежно визначати температуру в капсулі при градуванні термометрів, що вивчаються.

Напруга з джерела живлення ДЖ через обмежуючий опір r_0 подається на діод Д у прямій полярності та вимірюється вольтметром V.

Сила струму в ланцюгу діода визначається амперметром А. Опір r_0 обмежує максимальний струм через діод, не допускаючи його перегріву та виходу з ладу.

Опір термістора Т вимірюється омметром Ω , що підключений до нього.

Вправа 1. Вимірювання температури за вольтамперною характеристикою діода

Для зняття вольтамперної характеристики діода включити джерело живлення ІП, цифровий вольтметр V та амперметр А. Шкали приладів повинні відповідати рекомендованим для цієї установки. Вольтметр повинен бути переведений на шкалу, що дозволяє вимірювати напругу з точністю 0,001 В. Поступово збільшуючи струм через діод (повертаючи ручку на панелі джерела живлення ІП), зняти вольтамперну характеристику діода, змінюючи силу струму в вказаному для даної установки діапазоні. Крок зі зняттям залежності $V(I)$ визначити самостійно таким чином, щоб було виміряно не менше 15 точок у всьому діапазоні можливих значень сили струму. Показання вольтметра V і амперметра А занести до таблиці. Опір діода набагато менше опору r_0 , а при збільшенні струму через діод воно ще зменшується. Тому напруга на діоді, що вимірюється вольтметром, значно менша, ніж напруга, створювана джерелом живлення ІП.

Обробка результатів

Побудувати графік залежності $\ln I$ від V . Виділити область графіка з лінійною залежністю (при малих напругах графік нелінійний, тому що в цій галузі взяте вище наближення $I_{нас} \ll I$ не виконується). Методом МНК знайти кутовий коефіцієнт нахилу лінійної ділянки графіка $M = d \ln I / dV$. За формулою (8) розрахувати температуру діода T . Оцінити похибку T .

Вправа 2. Градування напівпровідникових термометрів

У цій вправі проводиться градування двох напівпровідникових термометрів – діода, що працює в режимі постійного струму, та терморезистора. Щоб сила струму в ланцюгу діода залишалася незмінною в процесі вимірювань, його опір має бути набагато меншим за обмежувальний опір r_0 . Тоді струм через діод залишиться практично постійним, незважаючи на зміну температури та опору діода в процесі градування.

Встановити силу струму через діод, вказану на установці. Надалі при градуванні напругу джерела живлення ПП не змінювати. Вимірювання напруги на діоді ведеться за допомогою цифрового вольтметра V . Похибка вимірювань не має перевищувати 0,001 В. Вимір опору терморезистора ведеться омметром Ω .

Температура в капсулі з напівпровідниковими термометрами вимірюється в процесі градування рідинним термометром.

Записати показання вольтметра та омметра при кімнатній температурі. Потім увімкнути нагрівач, поставивши ключ на панелі з досліджуваними термометрами в положення «Увімк». Градування обох датчиків ведеться паралельно в режимі безперервного нагрівання. Потужність нагрівача розрахована таким чином, щоб нагрівання відбувалося з невеликою швидкістю, достатньою для встановлення однакових

температур датчиків та термометра. Через кожні 2 К необхідно записувати показання вольтметра V і омметра в таблицю. Нагрів ведеться до 50°C.

Обробка результатів

Побудувати графіки залежностей напруги на діоді від температури $V(T)$ та опору терморезистора від $R(T)$.

Для діода розрахувати константи A та B , що відповідають формулі (2) для лінійної частини графіка. Визначити чутливість діодного термометра за напругою

$$S_V = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = -A \text{ (В/К)}.$$

З параметра B розрахувати ϵ_g – ширину забороненої зони напівпровідника в електрон-вольтах (eВ).

Для терморезистора у разі лінійної залежності його опору від температури

$$S_R = -\frac{\Delta R}{\Delta T} \text{ в Ом/К.}$$

R(T) розрахувати його чутливість до опору

У разі нелінійної залежності R(T) розрахувати чутливість S_R для різних температур (не менше 5 значень) і побудувати графік чутливості поопору від температури $S_R(T)$.

Порівняти за чутливістю діодний термометр та терморезистор у діапазоні температур 35-40°C, розрахувавши «відносну» чутливість даних приладів

$$S_{\text{Діод}} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \text{ и } S_{\text{Ротн}} = -\frac{1}{R_{\text{ср}}} \frac{\Delta R}{\Delta T},$$

де $R_{\text{ср}}$ - середнє значення опору в діапазон температур 35-40°C.

Вправа 3. Вимірювання кінцевої температури за вольтамперною характеристикою діода

Після досягнення температури порядку 50°C, не вимикаючи нагрівач, ще раз зняти вольтамперну характеристику діода, аналогічно тому, як це робилося в першій вправі. Дані занести до таблиці. Повинне бути виміряне щонайменше 15 точок у всьому діапазоні доступних значень сили струму через діод.

Аналогічно вправі 1 розрахувати температуру діода T, оцінити її похибку. Порівняти отримане значення з температурою, яка була отримана в першій вправі, і показання рідинного термометра.

Контрольні питання

1. Що таке температура? Методи виміру температури?
2. Які матеріали називають напівпровідниками? Чим вони відрізняються від металів та діелектриків?
3. Яка властивість напівпровідників використовується для вимірювання температури?
4. Як поводить ся опір напівпровідників зі зміною температури? Чому?
5. Розподіл Больцмана та залежність прямого струму р–п-переходу від напруги.
6. Р–п-перехід та залежність його прямого та зворотного струму від температури (якісно).
7. У чому переваги та недоліки напівпровідникових термометрів у порівнянні з термопарними, рідинними та термометрами опору з металів?
8. Що таке чутливість напівпровідникового термометра? Чому вона залежить від температури?
9. Пояснити фізичні засади формули (10).

10. При яких температурах оптимальне застосування напівпровідникових термометрів? Чому?

Лабораторна робота 4.

Дослідження роботи термопари

Мета роботи - дослідження залежності термоерс термопари мідь-залізо від різниці температур спаїв.

Теоретичні положення

В електричному ланцюзі різнорідних провідників (напівпровідників) поява різниці температур спаїв призводить до виникнення в ній термоерс. Згідно з квантовою (зонною) теорією, виникнення термо обумовлено низкою факторів, серед яких найбільший внесок вносять контактна ϵ_k і дифузійна ϵ_d складові ЕРС. ЕРС термопари дорівнює алгебраїчній сумі складових:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_k + \epsilon_d$$

Контактна термоерс пов'язана зі зміною внутрішньої контактної різниці потенціалів, яка розраховується за рівнянням:

$$\Delta F_k = (F_2 - F_1) / e$$

де $F_2 - F_1$ положення рівня Фермі в першому і другому металах при даній температурі; e - заряд електрона.

Для замкненого кола з двох різнорідних металів в ізотермічних умовах скачки потенціалів на спаях однакові за величиною і протилежні за знаком, тобто контактна термоерс в цих умовах відсутня. При нагріванні одного спаю рівні Фермі того чи іншого металу починають знижуватися. Згідно зонної теорії, чим менше концентрація електронів в металі (менше рівень Фермі), тим швидше з ростом температури знижується рівень Фермі. Різниця в швидкостях убування рівнів Фермі контактує металів в гарячому спає призводить до зміни на ньому внутрішньої контактної різниці потенціалів. Це призводить до порушення рівності стрибків потенціалу на спаях термопари, тобто в ланцюзі з'являється контактна термоерс. Величина цієї ЕРС пропорційна різниці температур: $d\epsilon_k = b_1 dT$. Дифузійна термоЕРС з'являється в однорідному провіднику при виникненні уздовж нього градієнта температур. Під дією різниці температур на кінцях провідника протікає термодифузія, завдяки чому гарячий кінець провідника заряджається позитивно, а холодний негативно. У провіднику створюється електричне поле з градієнтом потенціалу, який прямо пропорційний градієнту температур в провіднику. Звідси дифузійна різниця потенціалів або дифузійна термоерс прямо пропорційна різниці температур: $d\epsilon_d = \beta dT$. Алгебраїчна сума d до ϵ_k і d до ϵ_d обумовлює термоерс термопари: $d\epsilon = d\epsilon_k + d\epsilon_d = (b_1 + \beta) dT$. Для невеликих різниць температур $b_1 + \beta$

$\Delta T = \alpha \Delta T$ (α - величина постійна), тому $dT = \alpha \Delta T$, (6.1) Для багатьох термопар при кінцевих різницях температур величина α непостійна. Згідно зі слів $dT = \alpha \Delta T$, вона змінюється з ростом температури.

Опис установки

Для принципової схеми установки (рис. 1) введіть позначення:

ИТ - досліджувана термопара залізо-мідь (Fe - Cu); ЕТ - еталонна термопара з постійною $\alpha = 33,8 \cdot 10^{-6}$ К В; Н - нагрівач; R - реостат для регулювання напруги в нагрівачі; В - клемник, до якого виведені кінці термопар ЕТ (1-2) і ИТ (2-3); мV - мілівольтметр для вимірювання термоЕРС; П - перемикач, що дозволяє підключити до мілівольтметра еталонну термопару (положення 1) і досліджувану термопару (положення 2).

Ліві спаи еталонної і випробуваної термопар поміщені в нагрівач Н, а праві знаходяться при кімнатній температурі. Еталонна термопара застосовується для визначення різниці температур нагрівача і кімнатного повітря.

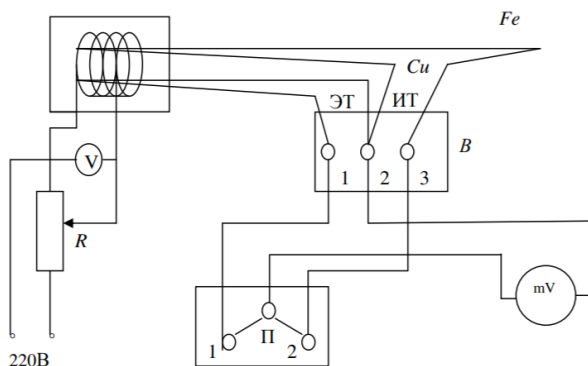


Рис. 4.1. Принципова схема установки

Порядок виконання роботи і обробки результатів вимірювань

1. Записати характеристики приладів.
2. Зіставити схему (рис. 4.1) з приладами лабораторної установки.
3. Ознайомитися з панеллю мілівольтметра.
4. З'єднати проводами перемикач П, клемник В і мілівольтметр.
5. Встановити перемикач М2 в положення І.

Ввести повністю реостат і включити нагрівач в мережу (напруга 220 В) і через 2 хв. поставити реостатом напруга (50 ÷ 60) В. Постійна температура в нагрівачі встановиться приблизно через 5 хв.

6. Виміряти термоерс еталонної термопари. Для цього перемикач П встановити в положення 1. Потім поставити перемикач П в положення 2 і виміряти ЕРС випробуваної термопари, результати записати в таб. 6.1. 7. Встановити напругу в нагрівачі (70 ÷ 80) В і почекати 5 хв. Провести ті ж операції, що і в п. 6. 8. При високих температурах полярність термоерс випробуваної термопари може змінюватися. 9. Вимірювання закінчити при напрузі нагрівача 200 В. Результати вимірювань занести в табл. 1.

Таблиця 4.1. - Результати вимірювань

№п/п	$U, В$	$\mathcal{E}_{\text{ет}}, мВ$	$\Delta T, К$	$\mathcal{E}_{\text{ит}}, мВ$

Обробка результатів експерименту

1. Розрахувати різницю температур T за показаннями еталонної термопари. Дані записати в таблицю (1).

2. Побудувати графік залежностей $\mathcal{E}_{\text{ит}} = f(\Delta T)$.

3. Використовуючи графік $\mathcal{E}_{\text{ит}} = f(\Delta T)$, розрахувати α_{12} для наступних значень температур: 50, 100, 150, 200, ..., 500 (600)°С.

4. Для цього на осі ΔT відкласти 20°С по обидві сторони від зазначених температур і за графіком $\mathcal{E}_{\text{ит}} = f(\Delta T)$ визначити $\Delta \mathcal{E}$, відповідні збільшенню температури $\Delta(\Delta T) = 40^\circ\text{C}$, тоді $\alpha_{12} = (\Delta \mathcal{E}_{\text{ит}}) / (\Delta(\Delta T)) = \Delta \mathcal{E} / 40$ 12 $\varepsilon \varepsilon$ іт.

5. Значення $\Delta(T)$, $\Delta(\Delta T)$, $\Delta \mathcal{E}_{\text{ит}}$, α_{12} занести в табл. 2.

Таблиця 4.2. - Результати вимірювань

№ п/п	$\Delta(\Delta T), ^\circ\text{C}$	$\Delta \mathcal{E}_{\text{ит}}, мВ$	$\alpha_{12}, мВ/К$

Побудувати графік залежності $\alpha_{12} = f(\Delta T)$

Контрольні питання

1. Які причини виникнення термо?
 2. Що таке термопара, термостолбик?
 3. Застосування термопар в термостолбиками.
 4. Фізичний і геометричний сенс постійної термопари α_{12} .
- абораторна робота ФТ.11

Лабораторна робота 5.

Дослідження резонансних характеристик п'єзоелектричних перетворювачів

Мета роботи: визначити власну і резонансні частоти п'єзоелектричних перетворювачів різного типу; зняти резонансну - амплітудно-частотну характеристику; за отриманими даними розрахувати пружні параметри досліджуваних пьезоелектриків.

Прилади й устаткування: генератор високочастотних коливань (ГВЧ), електронний осцилограф, високочастотна камера-тримач, сполучні ВЧ-кабелі.

1. Теорія п'єзоелектричного перетворювача

П'єзоелектричні датчики

П'єзоелектричні датчики відносяться до датчиків генераторного типу.

Розрізняють прямий і зворотний п'єзоелектричний ефект. Прямий ефект полягає в тому, що на гранях деяких кристалів при їх стисненні або розтягуванні з'являються електричні заряди, подібні поляризаційним.

Прямий п'єзоелектричний ефект використовується для вимірювання швидко протікаючих динамічних процесів – тиску в стволах знарядь при пострілі, тиску газів у двигунах внутрішнього згорання, тиску звукових коливань. Велике застосування одержали п'єзоелектричні адаптери (звукознімачі), манометри, вібратори, вимірювачі прискорень (акселерометри) і багато інших пристроїв.

Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає в тому, що при внесенні пьезокристалла в електричне поле, силові лінії якого збігаються з напрямом п'єзоелектричної вісі, відбувається зміна геометричних розмірів кристала (стиснення або розтягнення).

Матеріали п'єзокристалів: кварц, сегнетова сіль, титанат барію, турмалін, метаніобат свинцю і барію. Матеріали відрізняються величиною п'єзоелектричної постійної ($K_0 = 2 \times 10^{-12} - 150 \times 10^{-12}$ Кл/Н) та іншими параметрами. На рис. 5.1. показано пристрій п'єзоелектричного датчика.

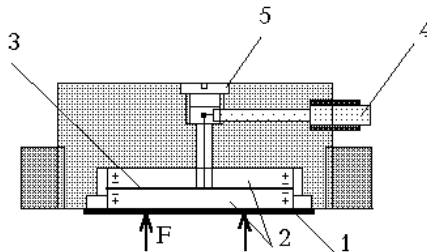


Рис. 5.1. Пристрій п'єзоелектричного датчика

На рис. 5.1 позначені: 1 – мембрана, яка сприймає зусилля, 2 – з'єднані паралельно пластини п'єзокристалів, 3 – латунна фольга, 4 – екранований сигнальний кабель і 5 – пробка, що закриває монтажний отвір.

Переваги: малі габарити, можливість вимірювання швидкозмінних навантажень, надійність і простота конструкції.

Недоліки: Різні у різних матеріалів: у кварцу – мала п'єзоелектрична постійна, у інших – температурна залежність.

Ультразвукові датчики застосовуються в гідроакустиці та в промисловості, при дефектоскопії деталей, а також в ряді приладів – витратомірів, газоаналізаторах і ін. Їх основою служить акустична система, до складу якої входять ультразвукові приймачі на основі п'єзокерамічних елементів.

Області застосування п'єзоелектричних датчиків:

- 1) вимір вібрацій;
- 2) вимір тисків;
- 3) вимір зусиль;
- 4) вимір зосереджених сил;
- 5) вимір прискорень.

Експериментальна частина.

Необхідно дослідити резонансну частоту п'єзоелементів ПЗ-1. Для цього необхідно на п'єзоелемент подати синусоїдальний сигнал з генератора звукової частоти ГЗ-123. Змінюючи частоту від 1000 Гц до виявлення резонансної частоти на осцилографі С1-114. Провести експеримент три рази, для підвищення точності вимірів.

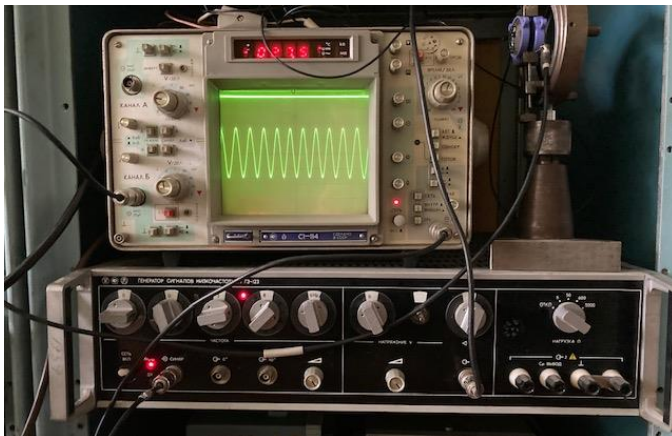


Рис. 5.1. Експериментальна установка



Рис. 5.2. П'єзодатчики ЗПІ: випромінювач і приймач

Завдання:

1. Накреслити схему експериментальної установки.
2. Визначити резонансну частоту ЗПІ.
3. Нарисувати графічну залежність рівня сигналу з приймача ЗПІ від частоти
4. Визначити абсолютні та відносні похибки експерименту по загальноприйнятій методиці

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте прямий та зворотний п'єзоефекти. Коли та ким вони були відкриті? Фізичне пояснення вказаних ефектів, використовувані параметри.
2. Матеріали та речовини, що володіють п'єзоефектом. У чому полягає відмінність п'єзо-електриків та сегнетоелектриків?
3. Що таке п'єзомодуль та його різновиди?
4. У яких галузях науки та техніки застосовують п'єзоелементи?
5. У чому полягають переваги керамічних п'єзоелементів та п'єзопластмас?
6. Як проводиться тарування п'єзодатчиків. Вимоги до апаратури.
7. Чому вимір п'єзомодуля виробляють не при навантаженні п'єзоелемента, а при знятті з нього механічного навантаження?
8. Що таке коефіцієнт лінійної регресії та коефіцієнт кореляції? Їхній фізичний сенс.

Лабораторна робота 6.

Тема: Дослідження роботи термомостової схеми вимірювання потужності

Мета: оволодіти навиками роботи з обладнанням, підготувати обладнання до вимірювань, провести вимірювання потужності неперервних

коливань з генератора в залежності від їх рівня і частоти, побудувати відповідні графічні залежності.

Обладнання: ватметр потужності що поглинається термісторний МЗ-10А, приймач перетворювач термісторний коаксіальний М5-89, приймальна антена, мобільний термінал.



Рис. 6.1. Експериментальне обладнання на основі моста термісторного

1. Технічний опис ватметра потужності термісторного МЗ-10а

1.1. Призначення

Ватметр потужності термісторний МЗ-10А призначений для виміру потужності безперервних коливань і середньої потужності імпульсно-модульованих ЗВЧ сигналів у діапазоні частот від 0,03 до 78,30 ГГц.

По точності ватметр відноситься до наступних класів ГОСТ 13605—75:

- до класу 10 при вимірі потужності в діапазоні частот від 0,03 до 7,5 ГГц у коаксіальному тракті й у діапазоні частот від 5,64 до 37,5 ГГц у хвилеводнім тракті;

- до класу 15 при вимірі потужності в діапазоні частот від 7,5 до 12,0 ГГц у коаксіальному тракті без атенюатора; у діапазоні частот від 0.03 до 5,64 при використанні атенюатора фіксованого коаксіального й у діапазоні частот від 37,5 до 53,6 ГГц у хвилеводнім тракті;

- до класу 25 при вимірі потужності у діапазоні частот від 53,6 до 78,3 ГГц у хвилеводнім тракті.

1.2. Технічні дані

1.2.1. Основна похибка ватметра без обліку похибки через непогодженість його входу не перевищує значень: 10% при вимірі потужності в діапазоні

частот 003—7,5 ГГц у коаксіальному тракті й у діапазоні частот 5,64—37,5 ГГц у хвилеводнім тракті;

1.4. Пристрій та робота ватметра і його складових частин

1.4.1. Принцип дії ватметра

Ватметр потужності, що поглинається, термісторний МЗ-10А працює на принципі поглинання усієї вимірюваної потужності, тобто на час виміру він замінює собою навантаження, на якому повинна бути виміряна потужність.

Ватметр складається з термісторного моста ЯМ-64 і виносних термісторних перетворювачів ЗВЧ потужності.

При вимірі потужності ЗВЧ за допомогою термісторного перетворювача використовується метод заміщення, заснований на еквівалентності теплової дії на термістор ЗВЧ потужності і потужності постійного чи низькочастотного струму.

Прийнята перетворювачем потужність надходить на датчик ЗВЧ потужності, у якому використовується терморезистор, включений паралельно у ЗВЧ тракт і послідовно в ланцюг заміщення.

Принцип дії вимірювальної частини ватметра пояснюється схемою на рис. 2. Вимірювальна частина ватметра складається з урівноваженого термісторного моста «МТ», в одне плече якого включений термістор, розташований у перетворювачі, допоміжного генератора 3 кГц «Г», стабілізатора струму «Ст» і схеми автоматичного керування балансом моста, що складається з підсилювача постійного струму «ППС», регулюючого елемента «РЕ» — транзистора, у емітерний ланцюг якого як навантаження включений індикаторний прилад «ПІ» із шунтами.

Живлення термісторного моста і регулюючого елемента, включених паралельно, здійснюється від стабілізатора струму, строго постійна потужність якого розподіляється між термісторним мостом і регулюючим елементом.

Перед виміром потужності ЗВЧ необхідно збалансувати міст ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ».

Початковий баланс відмічається індикаторним приладом «ПІ», струм через який у цей час дорівнює нулю (установка нуля ватметра). При початковому балансі моста вся потужність стабілізатора струму розсіюється на «МТ».

При вимірі потужності ЗВЧ баланс моста порушується і напруга розбалансу подається на вхід ППС. Посилена напруга розбалансу з виходу ППС надходить на регулюючий елемент, струм через який збільшується, викликаючи зменшення постійного струму, що протікає через терморезистор, тому що відбувається перерозподіл потужності стабілізатора струму між термісторним мостом і регулюючим елементом. Зростання струму через регулюючий елемент, а отже, зменшення постійного струму

через терморезистор буде відбуватися доти, поки міст не прийде знову у стан балансу, у такий спосіб здійснюється автоматичне балансування моста.

При відновленні балансу моста потужність постійного струму на терморезисторі зменшується на величину, рівну величині вимірюваної потужності, що порушила початковий баланс.

Шкала індикаторного приладу «ППІ» що реєструє струм через регулюючий елемент, проградуїрована в різницях потужностей постійного струму, обумовлених виразом :

$$P_x = (J_{TO}^2 - J_{TX}^2) R_T$$

де P_x - вимірювана потужність;

J_{TO} - величина постійного струму через термістор при початковому балансі;

J_{TX} - величина постійного струму в момент балансу моста при подачі на термістор вимірюваної потужності;

R_T - опір термістора.

1.4.3. Конструкція

Ватметр складається з термісторного моста Я2М-64 і виносних термісторних перетворювачів.

Термісторний міст виконаний у виді компактного приладу на рознімному уніфікованому каркасі в безфулярному корпусі.

На передній панелі розташовані:

тумблер ввімкнення моста в мережу;

індикаторна лампочка «МЕРЕЖА»;

перемикач меж «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ mW»;

ручки «УСТАНОВКА НУЛЯ», «ГРУБО», «ТОЧНО», мікроамперметр.

На задній панелі моста розміщені:

- клеми для підключення перетворювачів «ТЕРМИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ».

- перемикач робочих опорів термістора «СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕРМИСТОРА Ω », четверте положення якого служить для закорочування рамки мікроамперметра,

- лічильник ЭСВ - 2,5—12,6.

2. Інструкція з експлуатації

2.1. Загальні вказівки

При експлуатації ватметра необхідно пам'ятати, що термісторні перетворювачі чуттєві до перевантажень, що можуть привести їх до виходу з ладу. Тому перетворювачі не можна підключати до тракту, де потужність перевищує верхню межу виміру потужності використовуваного перетворювача.

При балансуванні ватметра джерело ВЧ потужності повинно бути виключене.

По ступені захисту від поразки електричним струмом ватметр відноситься до класу 1 за ГОСТ 12.2.007.0—75.

2.2. Указівка мір безпеки

У ватметрі МЗ-10А напруга мережі 220 В, тому при експлуатації його необхідно заземлювати.

Розкриття і ремонт виробляються тільки на відключеному від мережі ватметрі.

При експлуатації ватметра і його перевірці необхідно дотримувати правила техніки безпеки при роботі зі ЗВЧ пристроями, що випромінюють потужність. При інтенсивному випромінюванні (більше 10 мкВт/см²) необхідно застосовувати захисні засоби (захисні очки, спеціальні костюми, що поглинають і захисні екрани і т.д.).

2.3. Підготовка до роботи

Для підготовки ватметра до роботи необхідно:

- тумблер харчування ватметра поставити у виключене положення;
- перемикач мережі установити в положення, що відповідає напрузі і частоті живильної мережі;
- з'єднати земляний пелюсток мережного шнура з зануленим затиском живильної мережі;
- підключити термісторний перетворювач на потрібний діапазон частот до клем для підключення перетворювачів;
- перемикач «СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕРМИСТОРА Ω » поставити в положення, що відповідає робочому опору перетворювача;
- ручку «УСТАНОВКА НУЛЯ» «ГРУБО» повернути вліво до упора, установити механічним коректором стрілку відлікового приладу на нуль.

2.4. Порядок роботи

2.4.1. Підготовка до проведення вимірів

Для підготовки ватметра до роботи необхідно:

- підключити кабель живлення до мережі і тумблер «СЕТЬ» поставити у верхнє положення, при цьому загоряється індикаторна лампочка (перед включенням у мережу перемикач «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ mW» поставити в положення «ВЫКЛ.»);
- поставити перемикач «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ mW» у положення, що відповідає верхній межі виміру використовуваного перетворювача і ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ» збалансувати міст, тобто установити нуль ватметра (установка балансу повинна вироблятися при повній відсутності ВЧ сигналу на вході перетворювача);
- прогріти ватметр протягом 30 хв, приєднати вхід) перетворювача до джерела вимірюваної потужності.

Для зручності при вимірах необхідно установити ваттметр за допомогою упора під відповідним кутом нахилу.

2.4.2. Проведення вимірів

Положення перемикача «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ mW» повинне відповідати вимірюваній потужності. Якщо потужність ВЧ більше 10 мВт у діапазоні частот 0,03—5,64 ГГц, необхідно включити коаксіальний атенюатор на 20 Дб.

При вимірах на межах менших 5 мВт потрібно попередньо збалансувати міст на межі 5 мВт, після чого включити послідовно межі 1,5; 0,5; 0,15 мВт із добалансуванням моста ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ», «ТОЧНО».

Вимірювана потужність підраховується по формулі

$$P_{\text{вим}} = \frac{P_{\text{відр}}}{K_{\text{эф}}}$$

де $P_{\text{відр}}$ — потужність, зчитана по шкалі індикаторного пристрою;

$K_{\text{эф}}$ — коефіцієнт ефективності перетворювача на вимірюваній частоті.

Якщо виміри проводяться на частоті, для якої у формулярі (паспорті) не вказане значення $K_{\text{эф}}$ перетворювача, то останній визначається методом лінійної інтерполяції.

При використанні атенюатора вимірювана потужність підраховується за формулою

$$P_{\text{вим}} = - \frac{P_{\text{відр}}}{K_{\text{эф}}} * n$$

де n — ослаблення атенюатора (раз), зазначене у формулярі на ваттметр.

Для підвищення точності вимірів рекомендується зробити перевірку нуля після того, як була виміряна потужність за допомогою ручки «УСТАНОВКА НУЛЯ», «ТОЧНО» і потім знову роблять вимір потужності.

В основну похибку ватметра, зазначену в технічних характеристиках, не входить похибка за рахунок неузгодженості.

Якщо необхідно довідатися межі, у яких лежить похибка за рахунок неузгодженості всього вимірювального тракту, то слід скористатись наступною нерівністю:

$$\left[\frac{K_{CT} U_B * (K_{CT} U_G * K_{CT} U_H + 1)^2}{K_{CT} U_H * (K_{CT} U_G * K_{CT} U_B)^2} - 1 \right] * 100\% \geq \delta P$$

$$\delta P \geq \left[\frac{K_{CT} U_B * (K_{CT} U_G + K_{CT} U_H)^2}{K_{CT} U_H * (K_{CT} U_G * K_{CT} U_B + 1)^2} - 1 \right] * 100\%$$

де δP — похибка за рахунок неузгодженості;

$K_{CT} U_B$ - коефіцієнт стоячої хвилі входу перетворювача,

$K_{CT} U_G$ - коефіцієнт стоячої хвилі виходу генератора,

$K_{CT} U_H$ - коефіцієнт стоячої хвилі входу реального навантаження, замість якого включається МЗ-10А для виміру потужності.

При вимірі середньої потужності в імпульсно-модульованому режимі необхідно, щоб частота слідування була не менш 20 Гц.

Потужність в імпульсі визначається за наступною формулою

$$P_{imp} = \frac{P_{сep}}{F * \tau_{imp}}$$

де P_{imp} - потужність в імпульсі;

$P_{сep}$ - середня потужність;

τ_{imp} - тривалість імпульсу;

F - частота проходження.

Примітка. При вимірах на межі 150мкВт для забезпечення необхідної точності необхідно провести не менш п'яти вимірів. За дійсне значення приймається середнє арифметичне результатів вимірів. На інших межах виміри потужності рекомендується робити не менш трьох разів.

1. Технічний опис перетворювача прийомного термісторного коаксіального М5-89

1.1 Призначення

1.1.1. Перетворювач прийомний термісторний коаксіальний М5-88 призначений для виміру потужності ЗВЧ сигналів неперервних коливань і середнього значення потужності імпульсно-модульованих сигналів у комплекті зі збалансованими мостами в діапазоні частот 0,03—7,5 ГГц (при потужності в імпульсі не більше 25 Вт і тривалості імпульсу не більше 100 мкс).

1.1.2. Перетворювач зберігає технічні характеристики в діапазоні робочих температур від 243 до 323 К (від мінус 30 до плюс 50°С) і відносній вологості до 98% при температурі 308 К (35°С).

1.2. Технічні дані

1.2.1. Діапазон частот перетворювача 0,03— 7,5 ГГц.

1.2.2. Максимальна вимірювана , потужність перетворювача 10 мВт.

1.2.3. Хвильовий опір перетворювача 50 Ом, переріз коаксиала 16/6,95мм. Перетворювач має вхідний роз'єм «вилка» типу П за ГОСТ 13317—80.

1.2.4. Робочий опір постійному струму 150 Ом.

1.2.5. Коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі (K_{CTU}) складає:

- не більше 1,4 у діапазоні частот 0,03—4 ГГц,
- не більше 1,5 у діапазоні частот понад 4 до 7,5 ГГц.

1.2.6. Коефіцієнт ефективності (k_{EF}) перетворювача складає:

- не менш 0,9 у діапазоні частот 0,03—2,5 ГГц,
- не менш 0,8 у діапазоні частот понад 2,5 до 7,5 ГГц.

Допустима похибка коефіцієнта ефективності не більш $\pm 6\%$.

1.2.7. Довгострокова нестабільність коефіцієнта ефективності не більш $\pm 6\%$.

1.2.8. Потужність зсуву перетворювача при робочому опорі при температурі $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 17—35 мВт.

Максимальна потужність зсуву при температурі $50 \pm 1^\circ\text{C}$ не менша 12 мВт.

Максимальна потужність зсуву при температурі мінус $30 \pm 1^\circ\text{C}$ не більша 50 мВт.

1.2.9. Чутливість перетворювача 6—200 м/мВт,

1.2.10. Перетворювач протягом п'яти хвилин витримує навантаження потужністю, що перевищує в 1,5 рази максимальну вимірювану потужність.

1.2.11. Перетворювач має термокомпенсаційну термісторну вставку.

Потужність зсуву термокомпенсуючої термісторної вставки при температурі навколишнього повітря $293 \pm 1\text{ K}$ ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) відрізняється менше, ніж на $\pm 20\%$ від потужностей зсуву робочих уставок, що входять у комплект перетворювача.

1.2.12. Максимальна швидкість дрейфу потужності зсуву при стрибку температури навколишнього повітря на 1°C без термокомпенсації не більше 10 мкВт/хв град, з термокомпенсацією—3 мкВт/хв град. Час встановлення максимальної швидкості дрейфу не більше 15 хв.

1.2.13. Максимальна швидкість дрейфу потужності зсуву при стрибку температури коаксіального з'єднувача на 1°C без термокомпенсації не більш 15 мкВт/хв град, з термокомпенсацією не більш 5 мкВт/хв град.

Час установлення максимальної швидкості дрейфу потужності зсуву не більше 10 хв.

1.2.14. Ефективність термокомпенсації з мостом ватметра МЗ-22А не менш 3.

1.2.15. Теплова постійна часу при стрибку температури навколишнього повітря не більш 20 хв.

1.2.16. Теплова постійна часу при стрибку температури коаксіального з'єднувача не більш 20 хв.

1.2.17. Перетворювач задовольняє вимогам п.п. 1.2.5, 1.2.6, 1.2.8 із трьома запасними вставками.

1.2.18. Перетворювач допускає безперервну роботу в робочих умовах протягом часу не менш 16 г. при збереженні своїх технічних характеристик.

1.4. Будова і робота М5-88

У перетворювачі М5-88 при вимірі ЗВЧ потужності використовується метод заміщення, заснований на еквівалентності теплової дії на терморезистор потужності ЗВЧ і потужності постійного струму, а також на еквівалентності зміни опору терморезистора при нагріванні його робочого тіла постійним струмом і струмом ЗВЧ.

Як датчики ЗВЧ потужності в перетворювачі застосований теплов'язаний терморезистор СТЗ-32, що включається паралельно у ЗВЧ тракт і послідовно в ланцюг заміщення.

Електрична схема перетворювача приведена на рис. 2.

Рис. 6.2. Електрична схема перетворювача: R1, R2—теплов'язний терморезистор СТЗ-32;

C1, C2—конструктивні конденсатори;

Др — дросель високочастотний

Перетворювач (рис. 2) складається з термісторної вставки, що представляє собою погоджене навантаження з терморезистором у ній, високочастотного переходу зі стандартного перерізу коаксиала на переріз коаксіального тракту термісторної вставки з конструктивним конденсатором у розриві центрального провідника коаксиала і рознімного футляра.

Конструктивний конденсатор виконаний у вигляді керамічної шайби з ємністю 800—1400 пФ.

Термісторна вставка (рис.6.4) являє собою відрізок коаксіального тракту, що закінчується термісторною камерою. Середній вивід терморезистора приварюється методом точкового зварювання до стрижня, а два до втулки і корпусу, між якими розташований керамічний конденсатор.

Конденсатори C1, C2 і дросель Др служать для розділу струмів вимірюваної ВЧ потужності і потужності зсуву. У корпусі перетворювача є камера, у яку поміщена термокомпенсуюча термісторна вставка, не зв'язана з ВЧ трактом, але в тих же температурних умовах, що і робоча вставка.

Ця вставка потрібна при використанні перетворювача в комплекті з вимірювачами потужності, для роботи яких необхідна наявність двох терморезисторів.

Для запобігання перетворювача від механічних ушкоджень і зменшення впливів навколишнього середовища на тепловий і часовий дрейф перетворювач знаходиться в пластмасовому футлярі. Усередині футляра знаходяться три робочі запасні вставки.

Підключення перетворювача до термісторного моста здійснюється кабелем, що закінчується кольоровими штепселями. Робоча вставка включається в ланцюг моста чорним і білим штепселями, термокомпенсуюча вставка — чорним і червоним штепселями.

2. Інструкція з експлуатації

2.1. Указівка мір безпеки

Запобіжні заходи при роботі з перетворювачами відповідають мірам, що приймаються звичайно при роботі з лабораторними радіотехнічними приладами загального застосування.

2.2. Підготовка до роботи

Перед початком роботи необхідно вивчити технічний опис і інструкцію з експлуатації.

При експлуатації перетворювача необхідно пам'ятати, що перетворювач містить термочуттєвий елемент, тому потрібно остерігатися сильних теплових потоків і великих перевантажень.

Для виміру ЗВЧ потужності необхідно приєднати перетворювач до термісторного моста.

Після підключення перетворювача уключити вимірювальний міст відповідно до інструкції по експлуатації.

Збалансувати міст на опорі 150 Ом і прогріти протягом часу, зазначеного в технічному описі на міст, але не менш 30 хв. Перед, подачею вимірюваної потужності виробляється установка нуля термісторного моста.

2.3. Порядок роботи

Приєднати перетворювач до вимірюваного ЗВЧ тракту, не подаючи ЗВЧ потужності.

Збалансувати міст на робочому опорі перетворювача.

Подати ЗВЧ потужність і провести виміри відповідно до інструкції по експлуатації моста. У тому випадку, якщо в процесі роботи необхідно виміряти потужність без відключення джерела ЗВЧ потужності, міст баланують, не підключаючи перетворювач до ЗВЧ тракту.

Вимірювана потужність підраховується за формулою:

$$P_{\text{вим}} = \frac{P_{\text{відр}}}{K_{\text{еф}}}$$

де $P_{\text{відр}}$ — потужність, зчитана по шкалі індикаторного пристрою;

$K_{\text{еф}}$ — коефіцієнт ефективності перетворювача, що вказаний у формулярі на перетворювач.

При вимірі потужності з використанням моста ватметра МЗ-22А перетворювач підключається до моста через резистори 50 ± 1 Ом, включені послідовно в ланцюгах робочого і термокомпенсуючого терморезисторів. У цьому випадку вимірювана потужність підраховується за формулою

$$P_{\text{вим}} = \frac{0.75 * P_{\text{відр}}}{K_{\text{еф}}}$$

Похибка виміру потужності визначається похибкою термісторного моста і похибкою атестації по $K_{\text{ЕФ}}$ прийомного перетворювача й обчислюється за формулою

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_M^2 + \delta_{\text{кеф}}^2}$$

де δ_M - похибка термісторного моста;

$\delta_{\text{КЕФ}}$ - похибка коефіцієнта ефективності.

У похибку виміру потужності не входить похибка за рахунок неузгодженості.

Додаткова похибка виміру потужності, що виникає при стрибку температури навколишнього повітря, дорівнює

$$\Delta P = V_0 * \Delta t * \Delta T$$

де V_0 - максимальна швидкість дрейфу потужності зсуву перетворювача, викликана стрибком температури, мкВт/хв. град;

ΔT - величина стрибка навколишньої температури, °С;

Δt - час виміру, рівний інтервалу часу між установкою нуля і відліком величини вимірюваної потужності, хв.

Завдання:

1. Вивчити будову ватметра термісторного МЗ-10А, приймача-перетворювача термісторного коаксіального М5-89.
2. Накреслити блок-схему ватметра термісторного МЗ-10А та епюри сигналів на вході та виході кожного блоку.
3. Провести вимірювання потужності на виході генератора у всьому діапазоні частот з заданим викладачем кроком. Вимірювання провести на трьох рівнях на виході генератора (рівні задає викладач).
4. Провести розрахунок потужності та побудувати графічні залежності отриманих значень від частоти. Провести аналіз отриманих даних.

Контрольні питання:

1. Який фізичний принцип дії термісторного перетворювача?
2. Яка будова термісторного перетворювача?
3. Який принцип дії вимірювальної частини ватметра?
4. Який принцип дії термісторного моста?
5. Яка роль стабілізатора струму вимірювальної частини ватметра?
6. У який спосіб здійснюється автоматичне балансування моста?

7. Яка будова ватметра?
8. Який порядок проведення вимірювань?
9. По якій формулі підраховується потужність?
10. Яким чином враховувати послаблення яке вносить атенуатор?
11. За якою формулою визначається потужність в імпульсі і яка мінімальна частота слідування імпульсів?
12. Який порядок проведення вимірювань?
13. Поясніть хід кривих частотних залежностей вимірюваної потужності, чим зумовлений нелінійний характер кривих?

Список рекомендованої літератури

1. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець та ін. ; за ред. Є. С. Поліщука ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. — 584 с. : іл. — Режим доступу: . — Тит. арк. парал. англ. — Бібліогр.: с. 577—580 (88 назв). — ISBN 978-617-607-777-0
2. Васюра А. С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики. Вінниця.: ВДТУ, 1999. — 157 с.

Навчальне видання

Перетворювачі та пристрої вимірювальної техніки

Методичні рекомендації до лабораторного практикуму

Автор: **Архелюк Олександр Дмитрович,**

Відповідальний за випуск **Маким'як П.П.**

Літературний редактор **Макарова О.П.**

Технічний редактор **Чорасва Г.К.**