

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторного практикуму з дисципліни

„ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА“

для студентів спеціальності
176 „Мікро- та наносистемна техніка“,
освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної й заочної форм навчання

Методичні вказівки до лабораторного практикуму з дисципліни „Вакуумна та плазмова електроніка“ для студентів спеціальності 176 „Мікро- та наносистемна техніка“, освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“ першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної й заочної форм навчання / Укл.: Валентин ПОГОСОВ, Андрій КОРОТУН. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 46 с.

Укладач: Валентин ПОГОСОВ, проф., д-р фіз.-матем. наук,
Андрій КОРОТУН, проф., канд. фіз.-мат. наук

Рецензент: Валерій КУРБАЦЬКИЙ, доц., канд. фіз.-матем. наук

Відповідальний за випуск: Андрій КОРОТУН, проф., канд. фіз.-мат.
наук

Затверджено
на засіданні кафедри
інформаційної безпеки
та наноелектроніки

Протокол №5
від „22“ січня 2025 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФІБЕК
Протокол №7
від “24” лютого 2025 р.

ЗМІСТ

1 Лабораторна робота №1 “Фізика і техніка вакууму. Прилади для вимірювання вакууму”	5
1.1 Загальні відомості.....	5
1.1.1 Основні поняття про вакуум.....	5
1.1.2 Засоби отримання вакууму.....	7
1.1.3 Фізичні основи вимірювання вакууму. Датчики.....	9
1.2 Порядок виконання роботи.....	13
1.3 Контрольні запитання.....	13
2 Лабораторна робота №2 “Термоелектронна емісія. Електровакуумний діод ”	14
2.1 Загальні відомості.....	14
2.2 Порядок виконання роботи.....	18
2.3 Контрольні запитання.....	20
3 Лабораторна робота №3 “Тріод”	20
3.1 Загальні відомості.....	20
3.1.1 Характеристики тріоду.....	20
3.1.2 Розрахунок динамічної характеристики приладу.....	23
3.2 Завдання до роботи.....	26
3.3 Контрольні запитання.....	29
4 Лабораторна робота №4 “Багатоелектродні електровакуумні прилади. Тетроди. Пентоди”	29
4.1 Загальні відомості.....	30
4.1.1 Тетроди.....	30
4.1.2 Променеві тетроди.....	31
4.1.3 Пентоди.....	32
4.2 Порядок виконання роботи.....	33
4.3 Контрольні запитання.....	33

5 Лабораторна робота №5 “Електронно-променеві трубки	33
5.1 Загальні відомості.....	33
5.2 Порядок виконання роботи	37
5.3 Контрольні запитання.	38
6 Лабораторна робота №6 “Йонні прилади, стабілітрони ”.....	38
6.1 Йонні прилади тліючого розряду.	38
6.1.1 Стабілітрони.	39
6.1.2 Тиратрон.	41
6.2 Порядок виконання роботи.	44
6.3 Контрольні запитання.	44
Рекомендована література	45
Додаток А: Ширина забороненої зони та спорідненість до електрона при кімнатній температурі в напівпровідниках та діелектриках.	46

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 “ФІЗИКА І ТЕХНІКА ВАКУУМУ. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВАКУУМУ”

Мета роботи: зробити огляд способів отримання вакуума; розкрити основні фізичні закономірності, що використовуються при вимірюванні вакууму; розглянути конструкції, принципи дії та характеристики приладів, що використовуються для вимірювання вакуума.

1.1 Загальні відомості

1.1.1 Основні поняття про вакуум

Вакуум – багатозначний фізичний термін, який у залежності від контексту може означати:

- Розріджений стан газу. Такий вакуум називають частковим.

Розрізняють високий, середній і низький вакуум. Високим називається вакуум, при якому довжина вільного пробігу молекул газу перевищує лінійні розміри посудини, в якій міститься газ; якщо вільний пробіг молекул газу і лінійні розміри посудини є сумірними величинами, то вакуум називається середнім, а якщо вільний пробіг молекул газу менший за лінійні розміри посудини – низьким.

На практиці якість вакууму вимірюється в залишковому тиску. Високий вакуум відповідає тиску, нижчому за 10^{-3} Торр. Максимально високий вакуум, якого можна досягти в сучасних лабораторіях, має тиск 10^{-13} Торр.

- Ідеалізована абстракція, простір, у якому немає зовсім речовини. Такий вакуум називають ідеальним.

- Фізична система без частинок і квантів поля. Це найнижчий стан квантової системи, при якому її енергія є мінімальною, який називають вакуумним станом. Згідно з принципом невизначеності для такого вакууму певна частина фізичних величин не може бути точно визначеною.

У вакуумній техніці розрізняють чотири основні ступені вакууму:

1. Довжина вільного пробігу молекули газу значно менше характерного розміру. У цьому випадку має місце низький вакуум.

2. Довжина вільного пробігу молекули газу порівняна з характерним розміром. У цьому випадку має місце *середній вакуум*.
3. Довжина вільного пробігу молекули перевищує характерний розмір. У цьому випадку має місце *високий вакуум*.
4. Існує ще і четверта ступінь вакууму – *надвисокий вакуум*.

У Міжнародній системі одиниць (SI) за одиницю тиску прийнятий паскаль (Па) — тиск, створюваний силою в 1 ньютон (Н), рівномірно розподіленої по поверхні площею 1 м^2 і спрямованої нормально до неї.

Основні одиниці вимірювання тиску:

- $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па} - 1 \text{ паскаль};$
- $1 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2} = 1 \text{ ат} - 1 \text{ технічна атмосфера};$
- 1 атм - 1 фізична атмосфера;
- 1 бар;
- 1 мм.рт.ст. - 1 Торр.;
- 1 п'єза.

Співвідношення між одиницею тиску системи SI та іншими несистемними одиницями наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Співвідношення між одиницями тиску

Па	ат = $\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$	атм	Бар	Торр	мм. вод.ст. $= \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$
1	$1,02 \cdot 10^5$	$9,87 \cdot 10^6$	10^5	$75 \cdot 10^4$	0,102
$9,81 \cdot 10^4$	1	0,968	0,981	736	10^4
$1,013 \cdot 10^5$	1,033	1	1,013	760	$1,033 \cdot 10^4$
10^5	1,02	0,987	1	750	$1,02 \cdot 10^4$
133	$\frac{1}{3},36 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1	13,6
9,81	10^{-4}	$9,68 \cdot 10^{-5}$	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$	1

1.1.2 Засоби отримання вакууму

Обертальні масляні насоси. Для отримання вакууму, що досягає однієї мільйонної атмосферного тиску, як і раніше застосовуються обертальні масляні насоси. Їх конструкції різноманітні, а швидкість відкачування становить від 0,3 до 300 л/с. На рис. 1.1 схематично зображено (в розрізі) такий насос однієї з широко поширених конструкцій. Циліндричний ротор R ексцентрично обертається в циліндричному корпусі з вхідним і вихідним патрубками (в останньому встановлений зворотний клапан N). У пазах ротора R сидять дві пластинки V і V1, які притискаються пружинами до внутрішніх стінок корпусу. Вся система занурена в масло, яке служить мастилом і забезпечує ущільнення зазорів між внутрішніми стінками корпусу і деталями ротора. Газ з відкачуваного обсягу, захоплений в порожнині A (після того, як верхня пластинка пройшла вхідний отвір), при подальшому повороті ротора стискається, поки під його тиском не відкриється зворотний клапан, і випускається назовні через масло зовнішньої камери. Такий процес повторюється два рази за один оберт ротора.

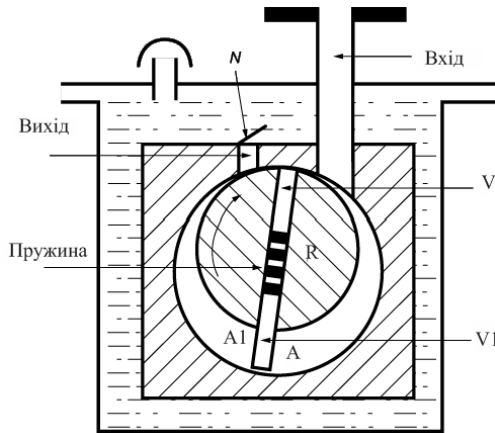
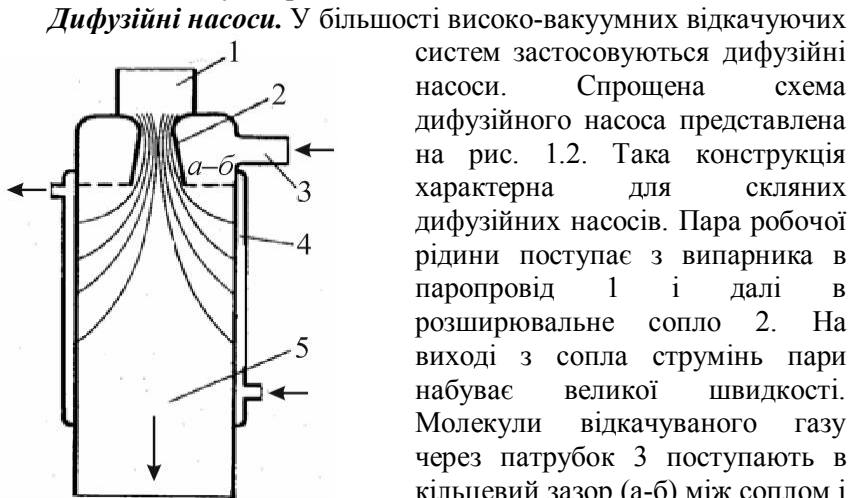


Рисунок 1.1 – Обертальний масляний насос в розрізі (спрощена схема). R – циліндричний ротор; V і V1 – підпружинені пластинки, що розділяють робочий об'єм насоса на дві частини – вхідну A і вихідну A1; N – пружинний зворотний клапан у впускному патрубку

Насос описаного типу неефективний при відкачці повітря, що містить конденсуючі пари (зазвичай це пари води), так як висока ступінь стиснення, необхідна для вихлопу в атмосферу, може призводити до їх конденсації в камері насоса. Разом з маслом конденсат потім знову потрапляє на вхід насоса.



1 – паропровід, 2 – сопло, 3 – патрубок впускання, 4 – холодильник, 5 – випускний патрубок

Рисунок 1.2 – Схема простого дифузійного пароструйного насоса

Суміш робочої пари з газом потрапляє на охолоджену стінку холодильника. При цьому пара конденсується на ній, а молекули відкачуваного газу продовжують свій рух у бік випускного патрубку 5, звідки вони відкачуються насосом попереднього розрідження. Конденсат робочої рідини із стінки холодильника стікає у випарник і знов включається в робочий цикл насоса.

Якщо тиск під струменем пари вище деякого гранично допустимого значення, то струмінь розмивається і її відкачуюча дія слабшає. Тому від допоміжного насоса потрібно, щоб він не тільки відводив всю відкачувану кількість газу, але і підтримував досить низький вказаний тиск. Для зниження вимог до граничного вакууму допоміжного насоса дифузійні насоси роблять багатоступеневими.

Кілька кільцевих сопел розташовують на різній висоті і розраховують їх так, щоб гранично допустимий тиск після нижнього сопла був досить високим без зменшення кількості газу, що проходить через струмінь першого сопла.

Турбомолекулярні насоси. Сучасний варіант молекулярного насоса Геде (1913) не вносить ні масляних, ні ртутних забруднень. Це, по суті, турбіна з 30 роторними секціями і таким же числом статорних. Частота обертання ротора – близько 20 000 об/с, зазори між ротором і статором менше 0,1 мм. Турбомолекулярний насос не може працювати з вихлопом в атмосферу і потребує у допоміжному насосі попереднього розрідження.

1.1.3 Фізичні основи вимірювання вакууму. Датчики

Теплові вакуумметри. Дія теплових вакуумметрів заснована на залежності теплопровідності газу від тиску. Основними елементами будь-якого теплоелектричного манометричного перетворювача є нитка розжарення (з постійною температурою і великою теплоємністю) і корпус приладу.

На рис. 1.3, 1.4 представлені конструкції найбільш поширених типів теплових манометрів та схеми їх включення. Перетворювачі в залежності від способу вимірювання температури діляться на термопарні та перетворювачі опору.

Корпус перетворювача ПМТ-6 виготовляється з нержавіючої сталі, нитка розжарення – з вольфрамового дроту діаметром 10 мкм і довжиною 80 мм. Манометр працює в режимі постійної температури нитки, що дорівнює 220 °С. При цьому опір нитки становить 116,5 Ом. Манометр включений в одне з плечей моста (рис. 1.3). Зміна сигналу, що свідчить про зміну тиску, реєструється стрілочним приладом. При зміні тиску від 10^{-2} до 30 Торр струм напруження нитки змінюється від 4 до 52 мА, а напруга від 0,5 до 6 В.

У діапазоні тисків від 1 до 10^{-3} Торр найбільш широко застосовуються термопарні манометри (рис. 1.4). Нитка розжарення в цьому манометрі виконує тільки функцію джерела тепла. Лампа працює в режимі постійного струму розжарення, який регулюється перебудовою баластного резистора.

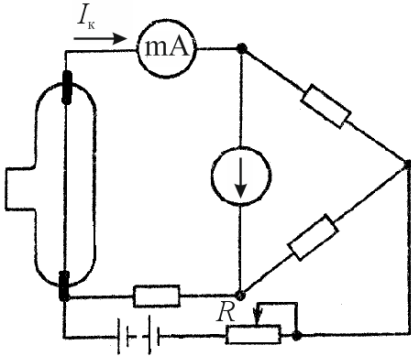
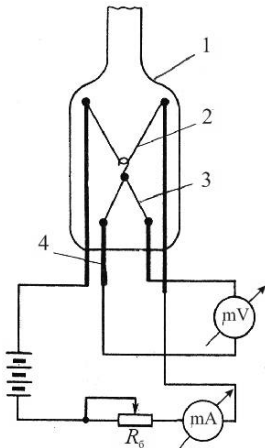


Рисунок 1.3 – Схема підключення манометричного перетворювача опору ПМТ-6



1 – корпус; 2 – нитка розжарення, 3 – термопара, 4 – живлення

Рисунок 1.4 – Термопарний манометричний перетворювач ПМТ-2

Тиск оцінюється по ЕРС термопари (рис. 1.5). Струм розжарення становить 110–135 мА і підбирається таким чином, щоб стрілка мілівольтметра точно збігалася з сотим діленням шкали.

Коли струм близько 120 мА лампа ПМТ-2 має верхню межу по тиску приблизно 10^{-1} Торр. Для боротьби з втратою чутливості при високому тиску досить збільшити температуру нитки, тобто підвищити струм напруження. При струмі 250–300 мА лампа ПМТ-2 може вимірювати тиску в діапазоні 10^{-1} Торр. Для цього діапазону точне значення струму розжарення підбирають при атмосферному тиску, тобто виробляється прив'язка градуйованої кривої до правої верхньої асимптотичної межі манометра. Датчики теплових вакуумметрів не бояться прориву атмосфери і мають практично необмежений термін служби.

Йонізаційні вакуумметри.

Число позитивних йонів, що утворюються в результаті зіткнень електронів з молеку-

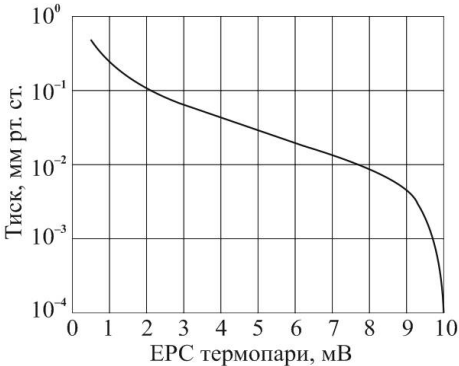


Рисунок 1.5 – Градувальна крива манометра ПМТ-2

Йонізаційний вакуумметр, використовується для вимірювання надвисокого вакууму. Він повинен забезпечувати максимально можливу чутливість при мінімальних величинах паразитних струмів. Розроблені згідно цим вимогам йонізаційні вакуумметри можна поділити на вакуумметри з гарячим і з холодним катодом.

Принцип дії **електронного йонізаційного вакуумметра** перетворювача заснований на прямій пропорційності між тиском і йонним струмом, що утворився в результаті йонізації термоелектронами залишкових газів.

Існують дві схеми електронного перетворювача: з внутрішнім і зовнішнім колектором. Основними елементами електронного йонізаційного манометричного перетворювача є прямонакальний катод, анод-сітка і колектор йонів. Катод може розташовуватися як в центрі сітки-анода, наприклад, в перетворювачах ПМІ-2 і ПМ-3-2, так і з зовнішнього боку, наприклад, в перетворювачі ПМІ-12-8 і ІМ-12. У першому випадку колектор охоплює анод, у другому – колектор розташовується по осі перетворювача.

Електричні потенціали електродів такі, що створюють для електронів прискорення різниці потенціалів у просторі між анодом і катодом і сповільнюючу різницю потенціалів у просторі між анодом і колектором йонів, причому уповільнююча різниця потенціалів за величиною більша прискорення різниці потенціалів. Зазвичай колектор має нульовий потенціал, анод – великий позитивний, катод –

лами газу, пропорційно щільності газу. Для вимірювання тиску методом йонізації не обхідно: а) джерело електронів (катод); б) прискорюючий електрод для підтримки електронного струму (анод); в) третій електрод, що збирає утворені йони (колектор). Тому перші йонізаційні вакуумметри представляли собою видозмінені вакуумні тріоди, в яких сітка була анодом, а анод – колектором.

невеликий позитивний потенціал. Живлення манометричного перетворювача здійснюється вимірювальним блоком вакуумметра.

Електронний йонізаційний манометричний перетворювач діє таким чином: розжарений прямим пропусканням струму катод випускає електрони. Електрони прискорюються в просторі між катодом і анодом. Більшість електронів пролітає анод-сітку, потрапляючи в уповільнене електричне поле. Оскільки уповільнююча різниця потенціалів більша прискорення різниці потенціалів, електрони, не долітаючи до колектора йонів, змінюють напрямок руху. Потім, набуваючи швидкість в напрямку до анода, електрони знову пролітають анод-сітку, гальмуються близько катода і знову направляються до анода. Таким чином, електрони здійснюють коливальні рухи біля анода.

На своєму шляху електрони йонізують газ. Позитивні йони, що утворилися в просторі між анодом і колектором йонів, притягуються останнім. При постійному струмі електронної емісії, постійному числі електронів, що коливаються близько анода, кількість актів йонізації, тобто кількість утворюються йонів, буде пропорційним концентрації молекул газу в просторі, тобто тиску. Таким чином, йонний струм колектора служить мірою тиску газу. Електронний перетворювач має неоднакову чутливість до різних газів, так як ефективність йонізації залежить від роду газу.

Для ламп ПМІ-2 швидкість йонного відкачування становить приблизно 0,01 л/с. Верхня межа електронного манометра (10^{-2} Торр) пов'язаний швидким розпиленням вольфрамового катода. Крім того, при високому тиску порушується лінійна залежність струму від тиску, коли середня довжина вільного пробігу електрона в обсязі приладу стає менше відстані між електронами. Збільшення верхньої межі вимірювання можна досягти за рахунок застосування спеціальних повітряностійких іридієвих катодів, а також за рахунок зменшення відстані між електродами.

Нижня межа вимірювання визначається фоновими струмами в ланцюзі колектора. Фонові струми виникають або в результаті м'якого рентгенівського випромінювання анодної сітки, або, як наслідок, автоелектронної емісії колектора та ультрафіолетового випромінювання накаливого катода, що супроводжуються відходом з колектора фотоелектронів. Рентгенівське випромінювання анодної сітки є результатом її бомбардування електронами. Автоелектронна

емісія колектора з'являється під дією різниці потенціалів 200–300 В між колектором і анодною сіткою. В лампі ПМІ-2 циліндричний колектор захоплює майже все рентгенівське випромінювання сітки, з цього нижня межа вимірювання манометрів із зовнішнім колектором типу ПМІ-2 становить 10^{-7} Торр.

Для більш точного судження за показаннями вакуумметра про тиск в системі в області низьких тисків необхідно враховувати склад газу, щоб ввести поправку на різну чутливість перетворювача до різних газів. Слід пам'ятати, що такі гази, як кисень або пари води, що містять кисень, викликають зменшення струму емісії, отруюючи катод. Навпаки, пари вуглеводнів викликають різке збільшення струму емісії. Тому безпосередньо перед виміром завжди перевіряють струм емісії.

Магнітні газорозрядні вакуумметри. Принцип дії магнітних перетворювачів заснований на залежності струму самостійного газового розряду в схрещених магнітному і електричному полях від тиску.

Динамічні і радіометричні вакуумметри. До цих вакуумметрів відносяться так звані в'язкісні і кінетомолекулярні вакуумметри. Дія перших заснована на вимірі часу загасання коливального руху поверхні в результаті ефекту демпфування після прикладання імпульсу. В кінетомолекулярних вакуумметрах використовується ефект переносу імпульсу від безперервно обертаючого диска до близько розташованого нерухомого, тиск визначається по обертальному моменту нерухомого диска.

1.2 Порядок виконання роботи

- 1 Провести відкачування повітря у вакуумному універсальному пості ВУП-4.
- 2 Через кожну хвилину записати покази датчиків вакууму.
- 3 За градуовальною кривою манометра визначити значення тиску у ВУП-4.
- 4 Побудувати залежність залишкового тиску у ВУП-4 від часу. Пояснити отриману криву.

1.3 Контрольні запитання

1. Що таке вакуум? Як його класифікують?
2. Які засоби використовуються для отримання вакууму?

3. Який принцип дії обертальних масляних насосів?
4. Який принцип дії дифузійних насосів?
5. Які фізичні принципи застосовуються для вимірювання вакууму?
6. Поясніть принцип дії теплових вакууметрів?
7. Поясніть принцип дії йонізаційних вакууметрів?

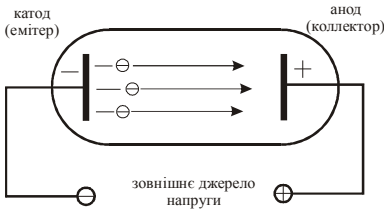
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 “ТЕРМОЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ. ЕЛЕКТРОВАКУУМНИЙ ДІОД”

Мета роботи: ознайомитися з явищем термоелектронної емісії, вакуумними діодами, їх параметрами та характеристиками, експериментально зняти ВАХ діоду, зняти температурну характеристику та визначити роботу виходу напівпровідникового матеріалу.

2.1 Загальні відомості

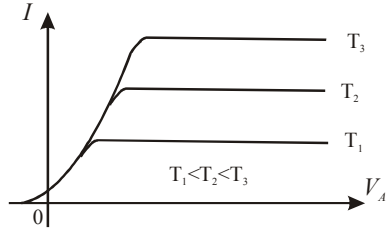
Термоелектронна емісія. *Термоелектронною емісією* називають випускання електронів поверхнею нагрітих провідних тіл. Вперше явище термоелектронної емісії виявив у досліді Т. А. Едісон (1883 р.).

Найпростіший прилад для спостереження термоелектронної емісії (термоелектронний діод) складається з двох металевих електродів, вміщених в об'єм з низьким тиском залишкових газів (рис. 2.1, а). Електрод, який емітує електрони, зазвичай називають *катодом*, хоча залежно від виду емісії використовують й інші терміни (термоемітер, фотоемітер, автоемітер). Електрод, який отримує електрони, зазвичай називають *анодом* або *колектором*. Незалежно від вживаної назви і знаку потенціалу, поданого на електроди, роботу виходу електронів катоду позначимо W_K , а роботу виходу електронів аноду - W_A .



a – принципова схема;

Рисунок 2.1 – Термоелектронний діод



б – ВАХ ідеального діода

Прикладаючи різницю потенціалів U_A між катодом і анодом і вимірюючи струм I , який протікає між електродами, отримаємо вольт-амперну характеристику (ВАХ) діода, тобто залежність анодного струму від анодної напруги (рис. 2.1, б).

Для електронів провідності тверде тіло представляють у вигляді енергетичної потенціальної ями з плоским дном, а на межі розділу (тверде тіло – вакуум) є потенціальний бар'єр – сходинок прямокутної форми (рис. 2, а). Із рис. 2, б можна побачити, що при відмінній від нуля температурі серед електронів провідності у твердому тілі є такі, енергія яких вища рівня вакууму. Ці електрони можуть попадати у вакуум, рухаючись над потенціальним бар'єром на межі.

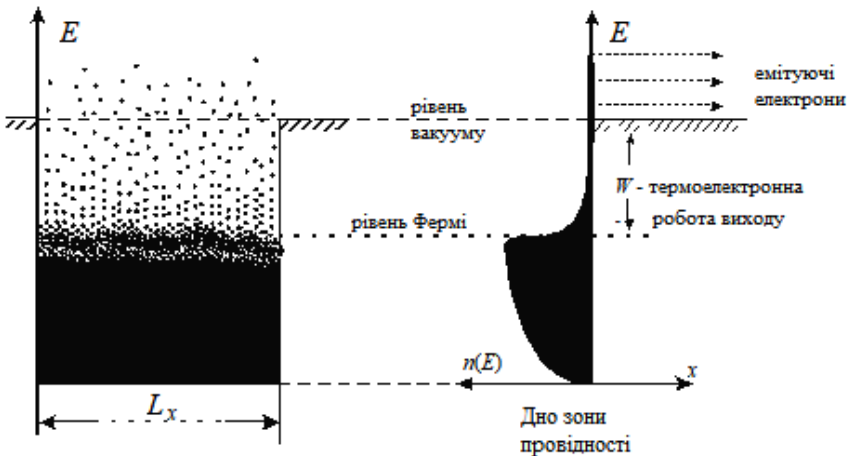


Рисунок 2.2 – Уявлення про тверде тіло як прямокутна потенціальна яма з плоским дном та потенціальними бар'єрами на межі тіла (*a*) та густина розподілу електронів за енергіями в металі (*б*)

Потенціальний бар'єр характеризується двома параметрами:

- 1) відстанню по осі енергії від рівня Фермі в кристалі до рівня вакууму – цю величину називають **термоелектронною роботою виходу** W ;
- 2) середнім значенням коефіцієнта надбар'єрного відбивання для електронів, які вилітають із катоду у вакуум.

Для прямокутного потенціального бар'єра Річардсон і Дешман (1928 р) обчислили максимальну густину струму (струму насичення) термоелектронної емісії, яку може забезпечити при температурі T термокатод з роботою виходу електронів W (**формула Річардсона – Дешмана**):

$$j = A_0 (1 - \bar{R}) T^2 e^{-\frac{W}{k_B T}}, \quad (2.1)$$

де $A_0 = \frac{4\pi m_e e k_B^2}{h^3} = 120,4 \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}$ – термемісійна стала Зоммерфельда;

T – температура катоду за абсолютною шкалою Кельвіна (К); \bar{R} – коефіцієнт відбивання електронів на межі тіло – вакуум (зазвичай не перевищує 0,07 і при оціночних розрахунках ним нехтують); W – робота виходу електронів із катоду; k_B – стала Больцмана,

$$k_B = \frac{1}{11600} \frac{\text{еВ}}{\text{К}}.$$

Для розрахунків рівняння (2.1) використовують найчастіше у вигляді:

$$j = 120,4 T^2 e^{-\frac{11600 W}{T}} \left(\frac{\text{А}}{\text{см}^2} \right), \quad (2.2)$$

де роботу виходу виражають в електронвольтах. Силу струму I термоелектронної емісії визначають за виразом: $I = jS$, де S – площа емітуючої поверхні катоду.

Оскільки точне значення \bar{R} у загальному випадку невідоме, замість істинної роботи виходу електронів $W_{\text{іст}}$, яка є у рівняннях (2.1) – (2), вводять ефективну роботу виходу $W_{\text{еф}}$ таку, що:

$$A_0(1-\bar{R})T^2 e^{\frac{W_{\text{іст}}}{k_B T}} = A_0 T^2 e^{\frac{W_{\text{eff}}}{k_B T}}. \quad (2.3)$$

Це призводить до того, що ефективна робота виходу дещо вища істинної роботи виходу $W_{\text{іст}}$, а саме:

$$W_{\text{eff}} = W_{\text{іст}} - k_B T \ln(1-\bar{R}). \quad (2.4)$$

Далі, опускаючи деталі, будемо записувати струм насичення ВАХ термоелектронної емісії рівнянням:

$$I_{\text{нас}} = B S T^2 e^{\frac{W}{k_B T}}. \quad (2.5)$$

Емісійний коефіцієнт катоду B залежить від матеріалу катоду та стану його поверхні.

В рівнянні (2.5) – дві невідомі величини – S і W . Тому потрібно знайти $I_{\text{нас}}$ за двох різних температур катоду T_1 і T_2 і розв'язати систему рівнянь (2.4) відносно W :

$$W = \frac{\ln I_{\text{нас}T_1} - \ln I_{\text{нас}T_2}}{\ln T_1^2 + \ln T_2^2} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)^{-1}. \quad (2.6)$$

Недолік цього методу – напівпровідник використовується як катод, який нагрівається до високої температури. Також необхідні виміри температури катоду. В іншій різновидності методу термоелектронної емісії напівпровідниковий матеріал, роботу виходу якого потрібно визначити, розташовується на аноді.

В області ВАХ, де струм змінюється при підвищенні U_A , він описується виразом:

$$I = I_{\text{нас}} \exp \left[\frac{e(U_A - U_{\text{конт}})}{k_B T} \right], \quad (2.7)$$

де $I_{\text{нас}}$ – струм насичення, $U_{\text{конт}}$ – контактна різниця потенціалів між напівпровідником та електродом з відомою роботою виходу W , $(-e)$ – заряд електрона.

На прямій гільці ВАХ ($U_A > 0$) для випадку $W_A > W_K$

$$U_{\text{конт}} = \frac{1}{e}(W_A - W_K) > 0. \quad (2.8)$$

Використання формули (2.7) можливо у двох варіантах:

1. Насичення струму наступає при $U_A - U_{\text{конт}} = 0$. За ВАХ діоду знаходять $U_{\text{конт}}$, а потім при відомій роботі виходу одного з електродів (катода) знаходять з виразу (2.8) роботу виходу напівпровідникового матеріалу:

$$W_A = W_K + eU_{\text{конт}}. \quad (2.9)$$

Нагадаємо, що робота виходу напівпровідника або діелектрика (на аноді) знаходиться з експериментальних даних як

$$W_A = \frac{1}{2}E_g + \chi, \quad (2.10)$$

де E_g – ширина забороненої зони, χ – спорідненість до електрона (див. Додаток А).

2. За іншим варіантом в одних і тих же умовах вимірюють ВАХ, змінюючи анод з напівпровідникового матеріалу на металевий анод з відомою роботою виходу. Маємо дві ВАХ, зміщені одна відносно одної на величину $\Delta U_{\text{конт}}$ (рис. 2.2). Вимірявши $\Delta U_{\text{конт}}$ і знаючи, що $W_1 > W_2$,

$$e\Delta U_{\text{конт}} = W_1 - W_2 > 0, \quad (2.11)$$

при відомій роботі виходу матеріалу одного з анодів ми маємо змогу знайти роботу виходу матеріалу іншого аноду.

$$W_1 = e\Delta U_{\text{конт}} + W_2 \rightarrow W_1 > W_2. \quad (2.12)$$

Недолік цього методу – необхідність зміни анодів в діоді без його розгерметизації за допомогою складного механічного пристрою.

2.2 Порядок виконання роботи

Дослідження анодної характеристики діоду:

1. Зібрати схему згідно рис. 2.3.
2. Подати живлення до катоду діоду згідно режиму лампи.

3. Зняти анодну характеристику ВАХ діода, записуючи в таблицю значення U_A та відповідні їм значення I_A .
4. Зменшивши на 0,5 – 1 В напругу розжарення катоду, зняти другу анодну характеристику при меншій температурі катоду.

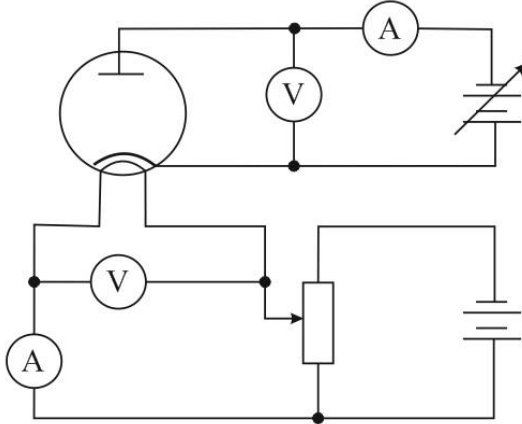


Рисунок 2.3 – Принципова схема вимірювання ВАХ діода

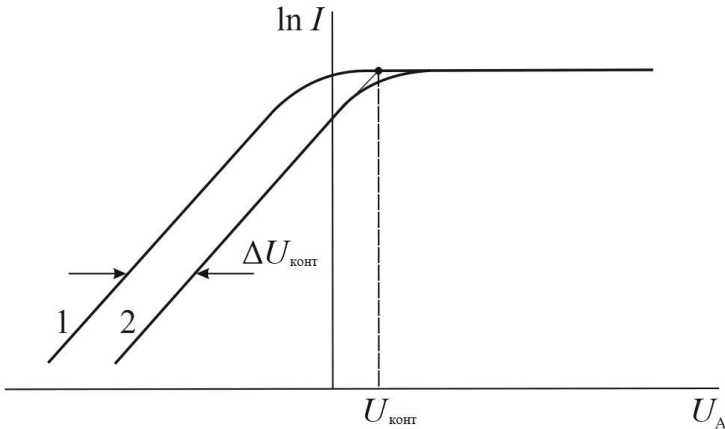


Рисунок 2.4 – ВАХ діоду при заміні матеріалу аноду. Залежності 1 і 2 зняті при різних матеріалах аноду

Обробка результатів спостережень:

1. Побудувати ВАХ діоду в координатах $\ln I ; U_A$ (рис. 2.4).
2. Користуючись графіком ВАХ, за точкою перетину лінійних ділянок знайти $U_{\text{конт}}$.
3. Розрахувати роботу виходу матеріалу анода за формулою (2.9) і (2.10) за відомої роботи виходу матеріалу катоду (вольфрам, $W_K = 4,5 \text{ eV}$).
4. Оформити звіт до лабораторної роботи.
5. Дати відповіді на контрольні запитання.

2.3 Контрольні запитання

1. Намалюйте розподіл електричного поля E та потенційний бар'єр поблизу поверхні металу?
2. Як залежить робота виходу електрона з металу через напруженість електричного поля?
3. Чим визначається кінетична енергія теплового руху електрона?
4. Назвіть причини появи термоелектронної емісії.
5. Що є причиною нелінійності ВАХ діоду?
6. Напишіть «закон 3/2».
7. Як залежить струм насичення від температури катоду?
8. Приведіть формулу для визначення роботи виходу.
9. Від чого залежить термоелектронний струм в діоді?
10. Як визначити роботу виходу матеріалу методом термоелектронної емісії?
11. Назвіть параметри діодів.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 “ТРИОД”

Мета роботи: ознайомитися з фізичними процесами, що мають місце при роботі триода; визначити характеристики триода.

3.1 Загальні відомості

3.1.1 Характеристики триоду

Триодом називають ЕВП, що має три електроди: катод, проміжний керуючий електрод – так звану “сітку”, анод. Роль

термокатоду і аноду в тріоді така ж сама, як і в діоді. Потенціалом на керуючій сітці маємо можливість змінювати величину анодного струму. При вмиканні тріоду між анодом і катодом подається анодна напруга U_a ; між сіткою і катодом – U_c . Величина анодного струму I_a залежить від температури катода, U_a та U_c . Чим більший потенціал сітки відносно катода, тим більше величина анодного струму I_a . Негативно заряджена сітка гальмує рух електронів та I_a зменшується аж до “зачинення” тріоду ($I_a = 0$ в точці А (рис. 3.1)).

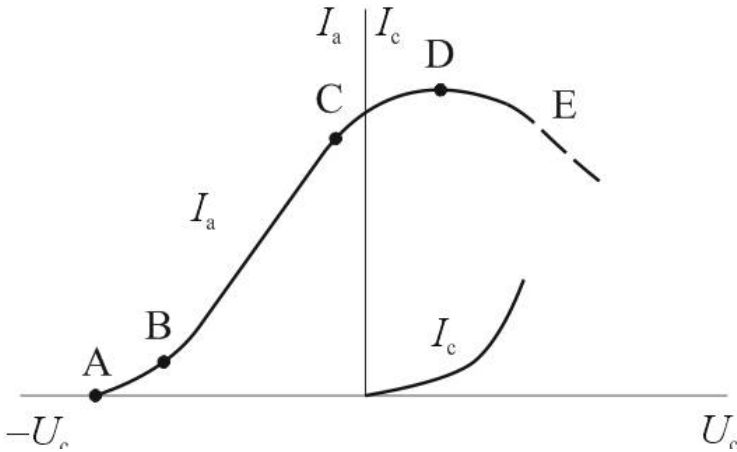


Рисунок 3.1 – Анодно-сіткова характеристика (АСХ) тріоду

Виділяються чотири характерні ділянки:

АВ – повільне зростання анодного струму;

ВС – майже лінійна ділянка АСХ, де відбувається інтенсивне розсмоктування об’ємного заряду (це робоча ділянка тріоду);

CD – перехід в область насичення як і в діоді;

DE – спад I_a , обумовлений зростанням струму сітки, яка при позитивному потенціалі перехоплює електрони на себе.

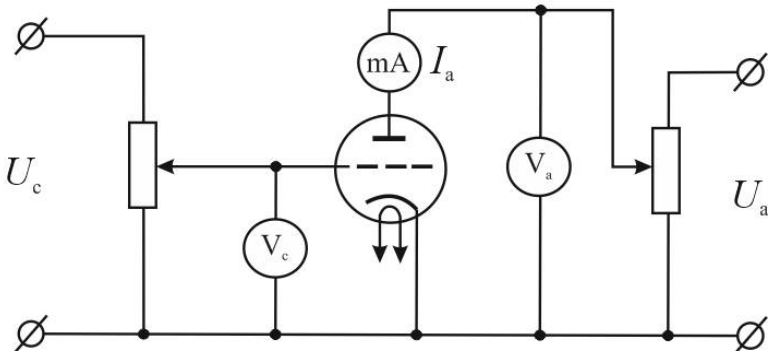


Рисунок 3.2 – Схема включення приладів для зняття анодно-сіточних та анодних характеристик

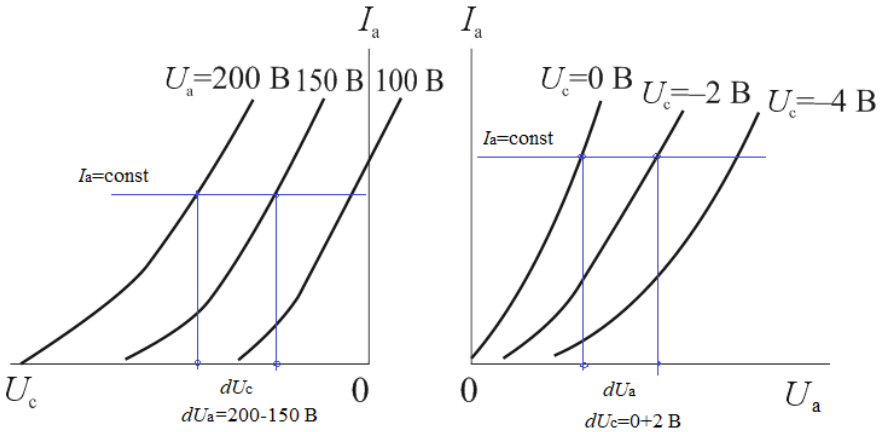


Рисунок 3.3 – Анодно - сіточні та анодні характеристики

Основними параметрами триоду є:

Крутість характеристики S зумовлює керуючі властивості сітки. Показує, на скільки зміниться анодний струм, при зміні сіткової напруги на 1В.

$$S = \left(\frac{dI_a}{dU_c} \right)_{U_a = \text{const}} ; \quad S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}, \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

Може бути знайдена в точці АСХ як тангенс кута нахилу дотичної в цій точці до вісі абсцис. Для більшості триодів $S = 1 \dots 100 \text{ mA/B}$.

Коефіцієнт підсилення μ характеризує підсилюючі властивості приладу. Показує у скільки разів U_c сильніше впливає на I_a , ніж U_a

$$\mu = - \left(\frac{dU_a}{dU_c} \right)_{I_a = \text{const}} \quad \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$$

μ – безрозмірна величина; $\mu = 1 \dots 100$. Знак “–” показує, що для підтримання $I_a = \text{const}$ приріст U_a повинен супроводжуватися зменшенням U_c та навпаки.

Проникливість $D = \frac{1}{\mu} = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a}$.

Внутрішній опір $R_i = \left(\frac{dU_a}{dI_a} \right)_{U_c = \text{const}}$; $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$, кОм

може бути знайдений в точці анодної характеристики як котангенс кута нахилу дотичної в цій точці до вісі абсцис.

Потужність, що віддається анодним джерелом живлення

$$P_{a \text{ ср}} = I_{a \text{ ср}} E_a$$

Коефіцієнт корисної дії $\eta = P_{\text{вих}} / P_{a \text{ ср}}$.

Основні параметри пов’язані між собою співвідношенням :

$$SDR_i = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \cdot \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = 1; \rightarrow \mu = SR_i$$

Практично основні характеристики знаходять графічно з анодно-сіточних та анодних характеристик.

Параметри, наведені в паспорті приладу відносяться до лінійної ділянки характеристик. На нижньому та верхньому перегибах характеристик S зменшується. При малих U_a зростає R_i . Найбільш постійна величина – μ .

Тріоди мають два основних недоліки:

- малий коефіцієнт підсилення;
- значні міжелектродні ємності (ємності сітка – катод, анод – катод анод – сітка).

Міжелектродні ємності погіршують роботу приладів, особливо на високих частотах. За рахунок прохідної ємності може

утворюватися небажаний зв'язок між анодним та сіточними колами, що може приводити до порушення нормального режиму роботи підсилювача, переходу в режим генератора (самозбудження). Шкідливий вплив прохідної ємності в багатоелектродних приладах (тетрадах, пентодах) зменшується екрануванням керуючої сітки додатковими сітками.

3.1.2 Розрахунок динамічної характеристики приладу

На рис. 3.4 наведена найпростіша схема підсилювача. Основними елементами підсилювача є: джерело анодного живлення E_a , джерело живлення сітки E_c , анодне навантаження R_a .

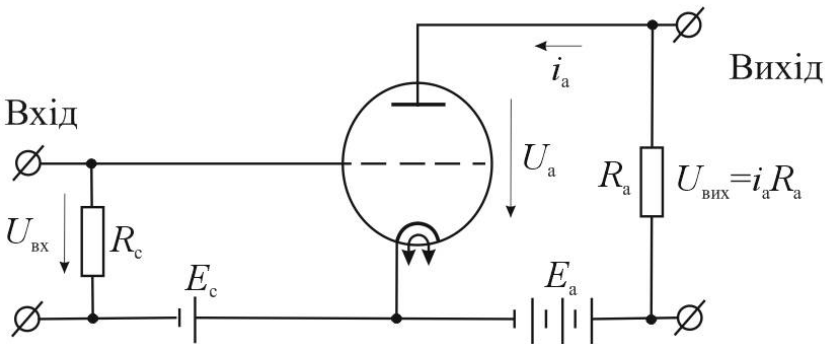


Рисунок 3.4 – Найпростіша схема підсилювача

В режимі спокою, коли відсутнє $U_{вх}$, через навантаження проходить анодний струм спокою I_{a0} . Його величина залежить від R_a , від ЕРС анодного E_a і сіточного E_c джерел живлення. Залежність анодного струму від напруги на сітці при наявності навантаження R_a відмінна від анодно-сіткової характеристики лампи і називається **динамічною характеристикою**. Її можна побудувати за допомогою сукупності анодних характеристик на основі рівняння анодного кола:

$$U_a = E_a - I_a R_a \quad \text{або} \quad I_a = \frac{E_a}{R_a} - \frac{U_a}{R_a},$$

якому відповідає пряма, так звана “лінія навантаження”.

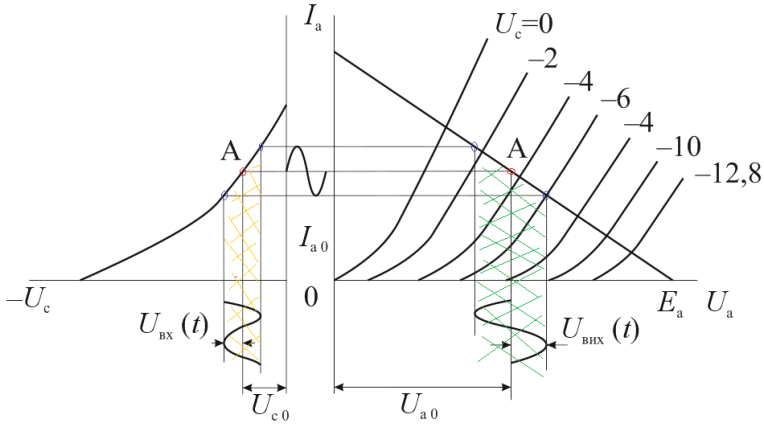


Рисунок 3.5 – Побудова динамічної характеристики триоду

Практично лінію навантаження будуть визначати за двома точками:

$$U_a = E_a, \text{ при } I_a = 0 \text{ і } I_a = \frac{E_a}{R_a}, \text{ при } U_a = 0.$$

За точками перетину лінії навантаження з анодними характеристиками визначають струми при різних U_c і будують динамічну характеристику.

Напругу зміщення $U_{н0}$ вибирають з тих міркувань, щоб робоча точка спокою **A** знаходилася посередині лінійної ділянки динамічної характеристики.

Тоді форма $i_a(t)$ буде відповідати формі вихідної напруги на резисторі R_a :

$$U_{\text{вих}} = i_a R_a$$

$U_{\text{вих}}$ в багато разів перебільшує вхідну напругу $U_{\text{вх}}$, в чому і полягає принцип роботи підсилювача.

Зміщення E_a визначає робочу точку **A** характеристики, а також анодну напругу в режимі спокою U_{a0} , анодний струм в режимі спокою I_{a0} і падіння напруги U_{Ra} :

$$U_{Ra} = I_{a0} R_a; U_{a0} = E_a - U_{Ra}.$$

Далі визначається потужність, яка розсіюється на аноді: $P_{a0} = I_{a0} U_{a0}$ і перевіряють, чи не перевищує вона максимально допустиме значення: $P_{a0} \leq P_{a \max}$, задане в паспорті.

Повна потужність, що віддається джерелом анодного живлення в режимі спокою:

$$P_0 = E_a I_{a0}.$$

Потужність постійного струму в навантаженні R_a :

$$P_{Ra} = I_{a0} U_{Ra},$$

причому $P_{Ra} = P_0 - P_{a0}$.

Після того, як знайдені графо-аналітично I_{am} (амплітуда змінної складової анодного струму) та $I_{a \text{ ср}} = I_{a0} + I_a = 0,25(i_{a \max} + i_{a \min} + 2I_{a0})$ можна розрахувати:

- підсилену (вихідну) напругу $U_m = U_{Rm} = U_{am} = I_{am} \cdot R_n$,
- коефіцієнт підсилення каскаду $\mu_i = \frac{U_{am}}{U_{cm}}$,
- корисну (вихідну) потужність $P_{\text{вих}} = 0,51 \cdot I_{am} U_{am}$.

3.2 Завдання до роботи

1. Для лампи, вказаної в таблиці 3.1, визначити графічно і побудувати залежність статичних параметрів $R_i = f(U_a)$, $S = f(U_a)$, $\mu = f(U_a)$ від анодної напруги при напрузі на сітці U_{c10} (по сімейству анодних характеристик), а також залежності статичних параметрів $R_i = \varphi(U_c)$, $S = \varphi(U_c)$, $\mu = \varphi(U_c)$ від напруги на першій сітці при напрузі на аноді U_{a0} . Напругу на сітці U_{c1} змінювати в межах від $U_{c1н}$ до $U_{c1к}$ з кроком ΔU_{c1} ; напругу на аноді U_a змінювати в межах від $U_{ан}$ до $U_{ак}$ з кроком ΔU_a . Для променевих тетродів і пентодів напруга на другій сітці – номінальна. Для подвійних тріодів слід брати одну половину лампи.

Таблиця 3.1 – Варіанти вихідних значень до завдання 1

№	Тип лампи	U_{c10} , В	U_{a0} , В	U_{c1n} , В	U_{c1k} , В	$U_{ан}$, В	$U_{ак}$, В	ΔU_{c1} , В	ΔU_a , В
1	6СЗБ	-4	120	0	-6	60	180	1	20
2	6С37Б	-5	100	0	-10	40	160	2	20
3	6С19П	-60	175	-5	-120	40	320	20	40
4	6Ф5П	-10	100	-4	-16	25	225	2	50
5	6Р1Р	0	200	+6	-6	40	320	2	40
6	6Н2П	-1	160	+0,5	-4	40	320	0,5	40
7	6Ф3П	-8	150	-2	-12	50	250	2	50
8	6К4П	-1	150	-0,5	-5	50	250	0,5	50
9	6Н6П	-4	120	0	-10	40	240	2	40
10	6Ф4П	-2	100	0	-3	50	250	0,5	50
11	6Н12П	-4	120	0	-10	40	200	1	20
12	6Н14П	-3	120	0	-6	40	200	1	20
13	6Н16Б	0	60	+2	-4	20	160	1	20
14	6Н26П	-1	100	+1	-3,5	20	200	1	40
15	6П14П	-4	120	0	-8	40	320	1	40
16	6П1П	-10	160	+5	-15	40	320	5	40
17	6П9	-3	200	0	-5	40	320	1	40
18	6П15П	-2	160	0	-5	40	320	1	40
19	6П18П	-6	240	0	-12	40	320	2	40
20	6П25Б	-8	100	-2	-12	20	200	2	40
21	6К4П	-1,5	150	-0,5	-5	50	250	1	50
22	6К6А	-1,5	100	0	-3	20	200	0,5	40
23	6Ж1П	-1,5	100	0	-2,5	20	200	0,5	40
24	6Ж2П	-2	100	0	-2,5	40	200	0,5	40
25	6П5П	-1,5	160	0	-2,5	40	240	0,5	40
26	6Ж10Б	-3	100	-1,5	-4,5	40	200	0,5	40
27	6Ж20П	-1,5	125	0	-2	50	250	0,5	50
28	6Ж23П	-1	150	0	-2	50	250	0,5	50

2. Лампа типу, вказаного в таблиці 3.2, працює в схемі підсилювача з резистивним навантаженням R_a в анодному ланцюгу при напрузі джерела анодного живлення E_a . Користуючись

сімейством анодних характеристик лампи, і якщо відомо, що E_{c1} – постійна напруга на керуючій сітці, на яку також подається змінна гармонічна напруга з амплітудою U_{c1m} , визначити основні робочі параметри лампи:

I_{a0} – постійну складову анодного струму;

I_{am} – амплітуду змінної складової анодного струму;

U_{am} – амплітуду змінної напруги на аноді;

U_{a0} – постійну складову анодної напруги;

U_{Rm} – амплітуду змінної складової напруги на R_a ;

S_i – робочу крутизну;

μ_i – робочий коефіцієнт підсилення;

P_0 – потужність постійного струму;

P_{a0} – потужність, розсіювана на аноді;

P_{Ra} – потужність, яка виділяється на навантаженні R_a ;

η – коефіцієнт корисної дії.

Побудувати анодно-сіточну характеристику.

Таблиця 3.2 – Таблиця варіантів вихідних даних до завдання 2

№ вар	Тип лампи	R_a , кОм	E_a , В	E_{c1} , В	$E_{c2н}$, В	U_{c1m} , В
1	6СЗБ	20	200	-6	-	5
2	6С19П	3	300	-50	-	30
3	6С37Б	4,5	150	-4	-	4
4	6Ф5П	20	250	-1,5	-	2
5	6Н1П	6,2	300	0	-	6
6	6Н2П	51	250	-1	-	1,5
7	6П14П	2,2	280	-5	250	4
8	6Н3П	20	200	-1	-	2
9	6Н6П	5,1	200	-4	-	3
10	6Н12С	10	200	-3	-	2
11	6Н14П	20	250	-4	-	2
12	6Н16Б	20	200	-2	-	3

13	6Н26П	6,2	150	-1	-	1,5
14	6Н1П	3	300	-10	250	5
15	6Н9	4,3	240	-3	150	2
16	6Н15П	7,5	350	-2,5	150	1
17	6П18П	2,2	280	-7	170	3
18	6П25Б	4,3	200	-10	110	3
19	ГУ-13	3	1000	+10	-	20
20	6К1Б	6,2	150	-2	120	1
21	6К4П	24	240	-2,5	100	1
22	6К13П	10	200	-2,5	90	1
23	6Ж9П	4,3	240	-1	150	0,5
24	6Ж5П	15	300	-1,5	150	0,5
25	6Ж20П	5,1	200	-1	150	0,5
26	ГУ-50	5,1	800	-10	250	10
27	6Ж23П	5,1	300	-1,5	150	0,5
28	6Ж1П	7,5	150	-1,5	120	1

3.3 Контрольні запитання

1. Назвіть параметри триоди.
2. Яка роль сітки в триоді.
3. Намалюйте анодні та анодно-сіточні характеристики триода.
4. Який вигляд має ВАХ триода?
5. Які параметри триода ви знаєте?
6. Які методи побудови вхідних та вихідних навантажувальних характеристик для випадку резистивного навантаження?
7. Які переваги екранованих ламп перед триодом?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 “БАГАТОЕЛЕКТРОДНІ ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ПРИЛАДИ. ТЕТРОДИ. ПЕНТОДИ”

Мета роботи: ознайомитися з фізичними процесами, що мають місце при роботі тетродів та пентодів; одержати вольт-амперні характеристик для тетродів та пентодів; визначити параметри тетродів і пентодів.

4.1 Загальні відомості

4.1.1 Тетроди

Істотним недоліком триодів як підсилюючих ламп є відносно велика величина прохідної ємності. Для її зменшення була створена електронна лампа з двома сітками – *тетрод* (рис. 4.1). Допоміжна сітка C_2 , яка розташована між управляючою сіткою C_1 та анодом, виконує роль електростатичного екрану, зменшуючи ємність між анодом та управляючою сіткою C_1 .

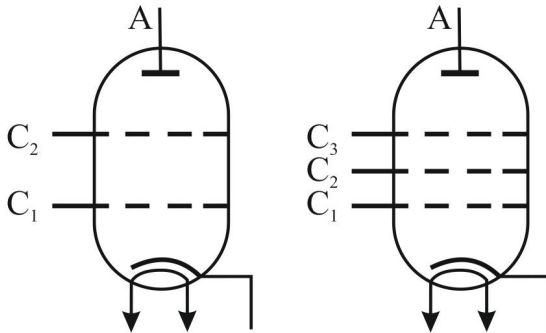


Рисунок 4.1 – Умовне позначення тетрода і пентода

Прохідна ємність в тетроді на 2÷3 порядки менша, чим в триоді. Потенціал сітки C_2 порядка 100...200 В. Однак, екрануюча сітка C_2 поряд з покращенням параметрів лампи, призводить до неприємного явища, так званого "динатронного ефекту", пов'язаного з вторинною електронною емісією. Якщо в триоді вторинні електрони, вибиті з аноду, знову повертаються на анод, то в тетроді вони можуть захоплюватися екрануючою сіткою C_2 ; при цьому анодна характеристика має "провали" (рис. 4.2), що робить роботу підсилюючих схем нестабільною.

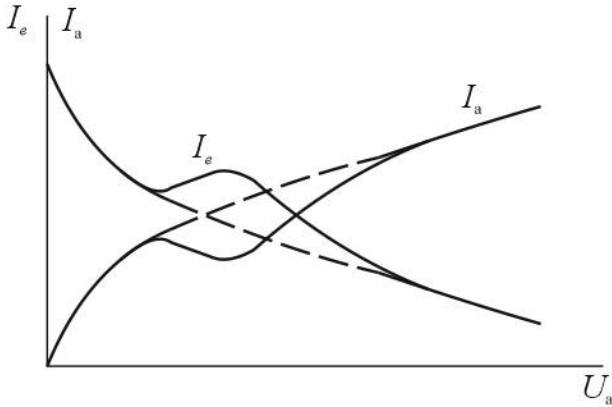


Рисунок 4.2 – Анодні характеристики тетрода за наявності динатронного ефекту

4.1.2 Променеві тетроди

Для усунення шкідливого впливу динатронного ефекту була розроблена спеціальна конструкція тетродів, які отримали назву *променевих тетродів*.

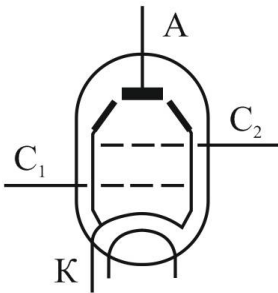


Рисунок 4.3 – Схематична конструкція променевого тетроду

Катод променевого тетроду має овальну форму. Керуюча та екрануюча сітки виготовлені з одним і тим же кроком намотки і їх витки розташовані один проти одного. Між анодом та екрануючою сіткою встановлені ще бокові екрани, електрично пов'язані з катодом (рис. 4.3). Завдяки такій конструкції потік електронів з катоду фокусується в щільні потоки променів.

В просторі між екрануючою сіткою і анодом утворюється негативний об'ємний заряд. Поле, утворене цим зарядом, гальмує рух вторинних електронів і повертає їх назад до аноду. Таким чином анодні характеристики практично не мають провалів. Променеві тетроди випускають пристосованими для порівняно великих анодних струмів (до 100 мА) та великих потужностей (до 200 Вт) та вище.

4.1.3 Пентоди

Іншим способом усунення шкідливого впливу динатронного ефекту є доповнення системи електродів в тетроді ще однією екрануючою сіткою S_3 яка з'єднана з катодом (антидинатронної сітки). Конструктивно вона виконана так, як управляюча та екрануюча сітки S_1 і S_2 . Дякуючи цій сітці, яка має негативний потенціал по відношенню до аноду і екрануючої сітки, вторинні електрони не можуть попасти на екрануючу сітку і повертаються на анод. Такий п'ятиелектродний прилад називають **пентодом**. Анодні характеристики пентодів не мають провалів і аналогічні анодним характеристикам променевого тетрода. Ослаблення впливу анодної напруги на результуюче поле лампи, а тому і на анодний струм, обумовлює більший коефіцієнт підсилення у пентодів (порядку кількох тисяч). Внутрішній опір пентодів лежить в межах від десятків кілоом до одиниць мегаом, значення крутизни – порядку десятків міліампер на вольт. Прокідна ємність пентодів ще менша, чим у тетродів за рахунок додаткової екрануючої дії антидинатронної сітки (всього соті долі пікофарад), дякуючи чому пентоди широко застосовуються в електронних пристроях, які працюють в області високих частот.

Основні параметри тетродів та пентодів: R_i , S , μ мають той же самий зміст, що і для тріодів (див. п. 3.1):

$$R_i = \left(\frac{dU_a}{dI_a} \right)_{U_c = \text{const}} ; S = \left(\frac{dI_a}{dU_c} \right)_{U_a = \text{const}} ; \mu = \left(\frac{dU_a}{dU_c} \right)_{I_a = \text{const}} ; \mu = R_i S .$$

4.2 Порядок виконання роботи

- Запропонуйте схему та зніміть анодні характеристики $I_a = f(U_a)$: а) тетрода; б) пентода за різних напругах на керуючій сітці U_{c11} , U_{c12} , U_{c13} .
- За результатами п. 1 побудуйте анодно-сіточні характеристики $I_a = f(U_c)$.

3. Побудуйте графічні залежності (по анодним характеристикам) $R_i = f(U_a)$, $S = f(U_a)$, $\mu = f(U_a)$ при заданій напрузі на сітці U_{c10} .
4. Побудуйте графічні залежності (по анодно-сіточним характеристикам) $R_i = \varphi(U_{c1})$, $S = \varphi(U_{c1})$, $\mu = \varphi(U_{c1})$ при заданій напрузі на аноді U_{a0} .

Напругу на сітці U_{c1} міняти в межах від U_{c1i} до U_{c1e} з кроком ΔU_{c1} . Напругу на аноді U_a міняти в межах від U_{ai} до U_{ae} з кроком ΔU_a . Для променевих тетродів та пентодів U_{c2} – номінальне значення. Для подвійних тріодів потрібно брати лише половину приладу.

4.3 Контрольні запитання

- 1 З якою метою в тетроді введена екрануюча сітка C_2 ?
- 2 Поясніть суть динаatronного ефекту.
- 3 Як змінюються величини внутрішнього опору R_i та коефіцієнту підсилення μ за рахунок введення екрануючої сітки?
- 4 Як усунути шкідливу дію динаatronного ефекта?
- 5 Розрахуйте основні параметри тетрода, пентода R_i , S , μ .
- 6 Чи має місце для пентода співвідношення $\mu = R_i S$?

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 “ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТРУБКИ”

Мета роботи: ознайомитися з фізичними процесами, що мають місце при роботі електроннопроменевої трубки; визначити параметри електроннопроменевої трубки.

5.1 Загальні відомості

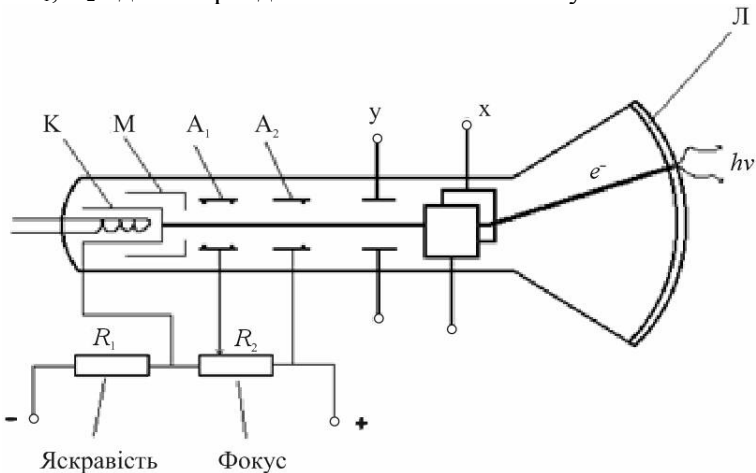
ЕПТ – електровакуумні прилади, що застосовуються для перетворення електричних сигналів в видиме зображення.

Електронний промінь, попадаючий в екран ЕПТ, викликає катодолюмінісценцію люмінофора, що покриває екран. При переміщенні променя змінюється положення випромінюючої точки (плями) на екрані. Таким чином електронний промінь на екрані ЕПТ може створювати зображення, що залежить від управляючого сигналу.

Формують та керують електронним променем при допомозі електричних та магнітних полів.

Будова ЕПТ з електростатичним фокусуванням та електростатичним управлінням електронним променем показана на рис. 5.1.

ЕПТ складається з скляного балону (залишковий тиск $10^{-7} - 10^{-8}$ Торр) та системи електродів: катода К, модулятора М, двох анодів A_1, A_2 і двох пар відхиляючих пластин x та y .



К – катод, М – модулятор, A_1, A_2 – аноди (електростатична лінза), x, y – електростатична відхиляюча система електродів, Л – шар люмінофора

Рисунок 5.1 – Схематична будова ЕПТ з електростатичною фокусировкою та електростатичним відхиленням променю

На внутрішню поверхню екрану нанесений тонкий шар люмінофора, що випромінює світло при попаданні на нього електронного променя. При переміщенні променя по поверхні катодолюмінофора на екрані ЕПТ спостерігаємо слід,

випромінювання якого продовжується ще деякий час і після проходження променю.

Катод K – виготовляється з невеликого нікелевого циліндру на торцеву частину якого нанесений оксидний шар з малою роботою виходу. Підігрівач катоду – вольфрамова спіраль розташована в середині катоду.

Катод оточений циліндричною оболонкою модулятора M , роль якого аналогічна ролі керуючої сітки в тріоді. Змінюючи потенціал модулятора потенціометром R , ми можемо регулювати яскравість точки (плями) на екрані за рахунок регулювання інтенсивності електронного потоку.

Конфігурація анодів A_1 та A_2 , а також їх потенціали підібрані таким чином, щоб створювані їми електричні поля діяли на потік електронів як збираючі лінзи (електронно-оптична система).

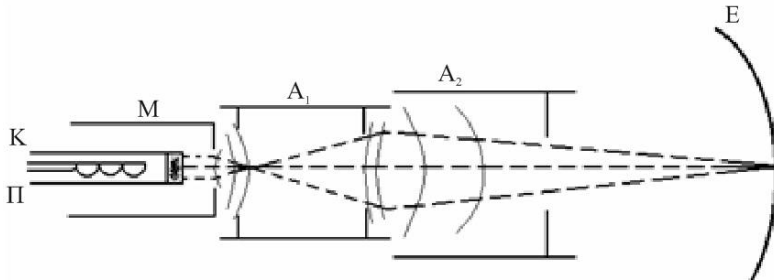


Рисунок 5.2 – Електростатична лінза в ЕПТ

На рис. 5.2 показані траєкторії електронів та розташування екіпотенціалів в електрооптичній системі ЕПТ. Змінюючи потенціали A_1 та A_2 можна підібрати фокусуючу дію лінз таким чином, щоб точка, в якій схрещуються траєкторії електронів, лежала в площині екрану E . Таким чином випромінююча пляма на екрані може мати розміри значно менші за розміри катоду. Щоправда за рахунок розсіювання світла в матеріалі люмінофора та скла екрану її розміри збільшуються.

ЕПТ з електростатичним відхиленням променю працюють за рахунок електростатичного впливу X – Y електродів. Якщо до однієї пари пластин підвести напругу, то електронний промінь відхилиться в сторону електрода, який має більш високий потенціал. При цьому точка на екрані зміститься пропорційно прикладеній напрузі. Для

підвищення чутливості ЕПТ розміри відхиляючих пластин роблять, по можливості, якнайбільшими, а також підбирають їх оптимальну конфігурацію для збереження лінійного закону відхилення променя при великих кутах відхилення.

Висока швидкість ЕПТ з електростатичним управлінням, обумовлена відсутністю енергійних елементів, дозволяє її застосування для дослідження швидкоплинних процесів в електроніці, радіолакації, тощо.

Так звані електронні осцилографи застосовуються для спостереження форми досліджуваного параметру, зняття характеристик приладів (ВАХ наприклад, тощо).

При дослідженнях форми параметру від часу його зміни на пластині горизонтального відхилення подається так звана “пилкообразна” напруга U_x (рис. 5.3). На пластині вертикального відхилення подається напруга U_y пропорційна досліджуваному параметру, наприклад $U_y = U_m \sin(\omega t)$. При спільній дії U_x та U_y випромінююча точка на екрані осцилографа описує синусоїду – графік зміни з часом навантаження U_y . Звісно, при цьому період зміни U_x повинен дорівнювати періоду зміни U_y . Пилкообразна напруга в осцилографі подається спеціальним генератором розгортки, який дозволяє змінювати період U_x , та підбирати його.

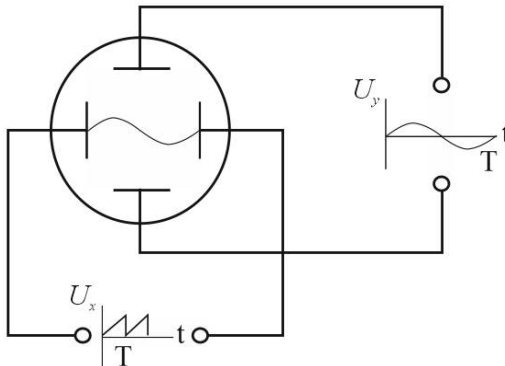


Рисунок 5.3 – Розгортка напруги U_y на екрані ЕПТ

При дослідженні динамічних характеристик (ВАХ наприклад) на X – відхиляючі пластини (рис. 5.1) подається напруга U_x – пропорційна I .

В телебаченні застосовується система магнітного відхилення, яка за рахунок більшого кута відхилення дозволяє скоротити довжину (габарити) ЕПТ при більших розмірах екрану.

Система магнітного відхилення складається з двох пар обмоток, розташованих перпендикулярно одна до одної та до всієї трубки. Магнітні поля обмоток відхиляють промінь в потрібному напрямі (з-за дії сили Лоренца). Недоліком цієї системи є значно менша швидкість, що не дозволяє її використовувати на високих частотах (вплив індукційності обмоток). Використовується також комбіновані системи, наприклад електростатичного фокусування та магнітного відхилення. Розроблені та використовуються більш складні ЕПТ:

- двохпроменеві для спостереження протікання двох процесів одночасно;
- трьохпроменеві для кольорового телебачення;
- знакодруючі ЕПТ;
- запам'ятовуючі ЕПТ;
- лазерні ЕПТ, проекційні ЕПТ;
- локаторні ЕПТ;
- комутаторні ЕПТ та інші.

Розгляд особливостей конструкцій та принципу дії пропонується для самостійної роботи.

5.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з різновидностями ЕПТ, принципом дій, призначенням, конструкціями параметрами та характеристиками.
2. Дослідити можливості застосування запропонованої ЕПТ в електронному осцилографі.
3. Визначити модуляційну характеристику ЕПТ: $I_{A_2} = f(U_m)$.
Запропонуйте схему вимірювань.
4. Визначити чутливість ЕПТ по Y – входу, X – входу. Запропонуйте схему вимірювань.
5. Дати відповідь на контрольні запитання.

5.3 Контрольні запитання

1. Опишіть принципи дії та конструкцію ЕПТ.
2. Опишіть системи фокусування електронного променю в ЕПТ.
3. Опишіть системи відхилення електронного променю в ЕПТ.
4. Опишіть конструкцію електронного прожектора ЕПТ.
5. Будова екрана ЕПТ.
6. Принцип дії електростатичної системи фокусування.
7. Принцип дії магнітної системи фокусування.
8. Чи впливає потенціал модулятора на фокусування променю?
9. Дайте визначення чутливості ЕПТ.
10. Яка буде траєкторія випромінюючої точки на екрані ЕПТ, якщо $U_y = U_m \sin(\omega t)$; $U_x = U_m \cos(\omega t)$.
11. Яка буде траєкторія випромінюючої точки на екрані ЕПТ, якщо $U_y = U_m \sin(\omega t + \phi)$; $U_x = U_m \cos(\omega t + \phi)$.
12. Як визначити зсув фаз ϕ в попередньому випадку?
13. Як позначається ЕПТ? Розшифруйте умовне позначення, наприклад, 13Л05А.
14. Спотворення зображення в ЕПТ.
15. Призначення, особливості конструкції та принцип дії:
 - запам'ятовуючої ЕПТ;
 - локаторної ЕПТ;
 - знакодруючої ЕПТ;
 - лазерної ЕПТ;
 - комутаторної ЕПТ;
 - ЕПТ для телебачення.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 “ЙОННІ ПРИЛАДИ, СТАБІЛІТРОНИ”

Мета роботи: вивчення конструкції, параметрів, характеристик стабілітронів.

6.1 Йонні прилади тліючого розряду

До *йонних приладів тліючого розряду* відносяться стабілітрони, сигнальні цифрові лампи, тиратрони з холодним катодом і деякі інші прилади. Ці прилади успішно застосовуються в релейних схемах автоматики, обчислювальної техніки, у схемах для дослідження процесів ядерної фізики і т.д.

Йонні прилади тліючого розряду мають значні переваги в порівнянні з електронними приладами. Для керування схемами, що використовують ці йонні прилади, необхідні в десятки і навіть сотні раз менші потужності, чим в аналогічних схемах з електронними лампами. Термін служби йонних приладів тліючого розряду складає більш як 50 000 год., у той час як у більшості електронних ламп термін служби не перевищує 2000–3000 год. Вартість йонних приладів тліючого розряду приблизно в 10–15 разів менше вартості відповідних електронних ламп. Ще однією перевагою йонних приладів тліючого розряду є те, що вони світяться при роботі. Це значно полегшує наладку устаткування і знижує до мінімуму час, необхідний для виявлення неполадок. Недоліками йонних приладів тліючого розряду є, в основному, інерційність і нестабільність запалювання.

6.1.1 Стабілітрони

Стабілітрон має два електроди – катод і анод, розміщені в скляному балоні, що заповнюється сумішшю інертних газів (аргон-неон, аргон-гелій і т.д.) до тиску 20–30 мм. рт. ст.

Катод К виготовляється з нікелю, сталі або молібдену у виді пустотілого циліндра. Велика площа поверхні катода стабілітрона дозволяє розширити діапазон зміни робочого струму. Внутрішня поверхня циліндра звичайно активується барієм або цезієм із метою зменшення роботи виходу катода. Анод А стабілітрона являє собою прямолінійний відрізок нікелевого дроту, укріпленого по осі циліндричного катода. На рис. 6.1 приведена вольт-амперна характеристика стабілітрона, з якої очевидно, що при напрузі, меншій напруги запалювання $U_{а\text{ зап}}$ струм практично залишається рівним нулю.

При запалюванні стабілітрона струм стрибком збільшується до декількох одиниць або десятків міліампер у залежності від величини опору резистора, що обмежує струм R_6 , і включається послідовно з

стабілітроном. Через збільшення напруги на цьому резисторі напруга на стабілітроні зменшується. Для більшості стабілітронів напруга запалювання $U_{а\text{ зап}}$ на 20–30 % більше напруги горіння, яку називають напругою стабілізації $U_{ст}$ завдяки тому, що при значних змінах анодного струму стабілітрона анодна напруга практично залишається незмінною, ці йонні прилади широко застосовуються для стабілізації напруги. на рис. 6.2 зображена найпростіша схема стабілізатора напруги.

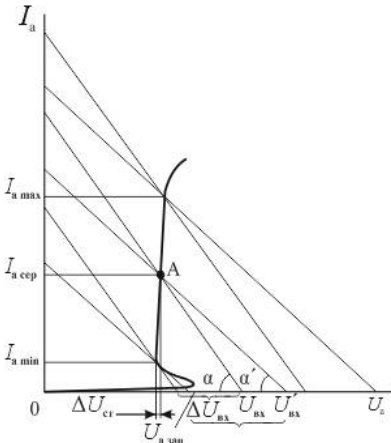


Рисунок 6.1 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона

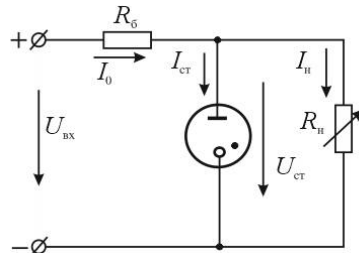


Рисунок 6.2 – Схема стабілізації напруги на стабілітроні

Стабілітрон підключається паралельно навантажувальному опорі R_n . В нерозгалужену частину схеми включений баластовий резистор R_b , по якому проходить струм $I_a = I_{ст} + I_n$. Вхідна напруга схеми $U_{вх} = I_0 R_b + U_n$, де $U_n = U_{ст}$.

Розглянемо роботу цієї схеми, коли змінюється вхідна напруга $U_{вх}$. Якщо вхідна напруга збільшується, то повинна була б збільшитися і напруга U_n на навантажувальному опорі. Але стабілітрон працює в такому режимі (точка А на рис. 6.2), що незначне збільшення напруги на ньому викликає різке зростання струму стабілітрона $I_{ст}$. При цьому збільшиться струм I_0 і падіння напруги на резисторі R_b . У результаті цього падіння напруги на навантаженні практично залишиться незмінним. У випадку, коли

змінюється струм навантаження I_n неважко переконатися, що напруга на навантаженні також залишиться практично незмінною.

Якість роботи схеми стабілізації оцінюється коефіцієнтом стабілізації $K_{ст}$, що являє собою частку від розподілу відносної зміни напруги $U_{вх.}$ на відносну зміну напруги U_n :

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх.} / U_{вх.}}{\Delta U_n / U_n}.$$

Схема зі стабілітроном має коефіцієнт стабілізації близько 10. Промисловість випускає стабілітрони на напруги стабілізації 75, 105 і 150 В, при цьому струм стабілітрона змінюється від 5 до 40 мА.

Слід зазначити, що через інерційність стабілітрона схема стабілізації не може працювати при швидких змінах вхідної напруги і струму навантаження. Для підвищення стабілізованої напруги допускається послідовне вмикання стабілітронів. Паралельне ж з'єднання стабілітронів використовувати не можна, тому що неможливо підібрати стабілітрони, що запаливалися б одночасно. Якщо один із стабілітронів займеться раніш, то це викличе зменшення напруги на обох стабілітронах і вже інший стабілітрон не зможе зайнятися.

6.1.2 Тиратрон

Газотрон – двохелектродний некерований газорозрядний прилад, наповнюваний інертним газом, воднем або парами ртуті, заснований на використуванні тліючого або несамостійного дугового розряду.

Газотрон тліючого розряду є приладом з холодним катодом і графітним анодом, що працює в режимі нормального тліючого розряду; наповнюється інертним газом (звично He) при тиску 13–25 кПа. Випрямляюча дія приладу заснована на особливості конструкції електродів: поверхня катода у багато разів перевищує поверхню анода. Для підвищення емісійної здатності катода використовують активуюче покриття (цезій, барій).

Газотрони тліючого розряду знаходять застосування як вентиля в системах запалення двигунів внутрішнього згорання, при цьому зворотна напруга може досягати декількох кіловольт, середній струм

складає 10–12 мА відношення максимального струму до середнього складає 7–9.

Тиратроном називається газотрон, забезпечений третім управляючим електродом (сіткою), розташованим між катодом і анодом.

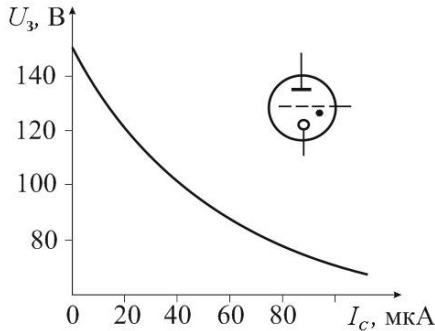


Рисунок 6.3 – Пускова характеристика тиратрона

Тиратрон тліючого розряду є керованим газорозрядним приладом з холодним катодом, в якому виникнення розряду в проміжку анод – катод здійснюється за допомогою управляючого електроду.

Катод тиратрона (наприклад, тиратрона типа МТХ-90) виконаний у вигляді нікелевого циліндра, внутрішня поверхня якого активується цезієм. Управляючий електрод виконаний у вигляді диска з отвором в центрі, через яке проходить стрижньовий анод з молібдену. Все це поміщається в скляний балон, заповнений неонам (тиск 250 Па).

Рівень напруги між анодом і катодом в тиратроні підбирається таким, при якому без участі поля управляючого електроду розряд неможливий. При подачі на управляючий електрод позитивного потенціалу (наприклад, 70 – 80 В для тиратрона типа МТХ-90) між управляючим електродом і катодом виникає тихий самостійний розряд, що створює початкову іонізацію. Тихий розряд є підготовчим, що полегшує виникнення основного тліючого розряду між анодом і катодом. При цьому потенціал запалення тиратрона знижується, і тиратрон відкривається. Анодний струм, одержуваний при відкритті тиратрона, значно більше струму в ланцюзі його управляючого електроду, що характеризує підсилювальні властивості тиратрона.

При подачі напруги між катодом і управляючим електродом (сіткою) в приладі виникає розряд між катодом і сіткою. Заряджені частинки, що утворилися в розряді, полегшують «пробій» основного газорозрядного проміжку: катод – анод. Зміною струму I_C в допоміжному проміжку (катод – сітка) регулюють напругу виникнення розряду U_3 в основному проміжку. Пускова характеристика тиратрона $U_3 = f(I_C)$ приведена на рис. 6.3.

З моменту запалення тиратрона струм в анодному ланцюзі його залишається незмінним. Після запалення тиратрона зміною потенціалу на сітці погасити його не можна. Це пояснюється тим, що поле управляючої сітки нейтралізується позитивними іонами. Тиратрон закривається лише після зняття або зниження анодної напруги до значення меншого, ніж напруги горіння U_r .

Тиратрони працюють при малих струмах (до 50 мА) середніх анодних напругах (150 – 300 В). Основними параметрами тиратронів тліючого розряду є: падіння напруги між катодом і анодом, катодом і сіткою при проходженні струму через тиратрон, максимальне значення анодного струму, час відновлення електричної міцності, контрольні точки пускових характеристик і довговічність. Різні типи цих тиратронів застосовуються, головним чином, в низькочастотних пристроях обчислювальної техніки і автоматики, наприклад як електронні реле, що дозволяють при малих струмах в управляючому ланцюзі комутувати сильноточні схеми.

6.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з приладами, необхідними для виконання роботи, і записати їх основні технічні дані, в тому числі для зазначеного керівником тиратрона його основні параметри: максимальне значення анодного струму, середнє значення анодного струму, напруга горіння, напруга зворотного запалювання та ін.
2. Зібрати схему для проведення вимірювань відповідно до рис. 6.4.

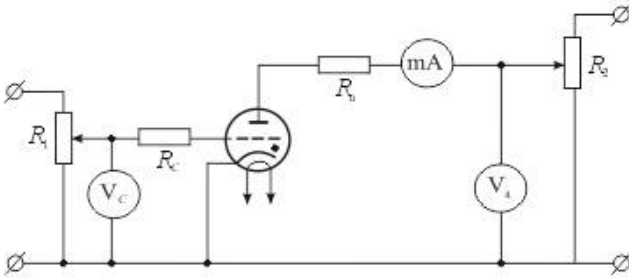


Рисунок 6.4 – Схема з'єднання для зняття характеристик тиратрона

3. Після розігріву нитки розжарення встановити реостатом в ланцюзі сітки найбільшу негативну сіткову напругу. Реостатом в анодному ланцюзі встановити напругу $U_a = 100$ В, і зменшуючи негативну напругу на сітці до моменту запалення тиратрона, помічати (записувати) сіткові напруги U_c і відповідні їм значення струму I_a в таблицю. Потім, змінюючи напругу на сітці, переконаватися в тому, що анодний струм залишається незмінним. Вимірювання повторити при інших значеннях анодної напруги.
4. За отриманими даними побудувати графіки анодно-сіткових характеристик $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.
5. Реостатом в анодному ланцюзі встановити анодну напругу $U_a = 0$ В. Реостатом в ланцюзі сітки встановити найбільше від'ємне значення сіткової напруги. Збільшуючи анодну напругу, помітити його значення U_{a3} , що відповідає запалюванню тиратрона. Повторити вимірювання при інших значеннях сіткової напруги. Зважаючи на нестабільність запалювання тиратрона кожне спостереження і запис його слід провести 3 рази, знаходячи середнє значення анодної напруги. Спостереження записати в таблицю.
6. За отриманими даними побудувати пускову характеристику тиратрона $U_{a3} = f(U_c)$.

6.3 Контрольні запитання

1. Яка роль позитивних йонів в утворенні струму йонного приладу?
2. Поясніть ВАХ йонного приладу?

3. Чи виникне розряд в йонному приладі, якщо його живити перемінною анодною напругою з періодом меншим за час де йонізації?
4. Який принцип роботи газорозрядного стабілітрона?
5. Як залежить коефіцієнт стабілізації $K_{ст}$ стабілітрона від опору баластного резистора R_0 ?
6. Який принцип роботи тиратрона?

Рекомендована література

1. С.Поп, І. Шароді. Фізична електроніка. Львів „Свросвіт”, 2001, 247с.
2. С.М. Левитський. Фізична електроніка: Підручник. К.:ВЦ „Київський університет”, 2005.-.153 с.
3. З. В. Стасюк, Р. І. Бігун, А. В.Бородчук, М. М. Козак, Б. Р. Пенюх. Лабораторний практикум з фізичної електроніки, ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2009.- 260 с.
4. Методичні вказівки до лабораторного практикуму з дисципліни „Вакуумна і плазмова електроніка” для студентів за напрямом підготовки 6.050801 „Мікро- і наноелектроніка“ денної й заочної форм навчання / Укл.: А. В. Бабіч, А. В. Коротун, Н. А. Смирнова. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2015 .– 62 с.

Додаток А:

Ширина забороненої зони та спорідненість до електрона при кімнатній температурі в деяких напівпровідниках та діелектриках

Матеріал	Si	Ge	AlP	AlAs	AlSb	GaP	GaAs	GaSb	InP
E_g , eВ	1,12	0,66	2,45	2,15	1,60	2,27	1,42	0,68	1,34
χ , eВ	4,05	4,13	3,44	3,51	3,65	3,08	4,07	4,06	4,38

Матеріал	InAs	InSb	ZnS	ZnSe	ZnTe	CdS	CdSe	CdTe
E_g , eВ	0,35	0,18	3,58	2,67	2,26	2,42	1,7	1,44
χ , eВ	4,92	4,59	3,9	4,09	3,5	4,5	4,95	4,28

Матеріал	AlN	GaN	InN	SiO ₂	CaF ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
E_g , eВ	6,2	3,42	1,9	8,8	12,2	≈ 5	≈ 8
χ , eВ	0,6	3,3	5,8	1,1	1,5	1,8	1,35