

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**„Мікроелектроніка надвисоких частот:  
польові транзистори з бар’єром Шоткі:**

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи та самостійної  
роботи студентів факультету електроніки всіх форм навчання.”

Київ  
“ПОЛІТЕХНІКА”  
2007

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з курсу „Мікроелектроніка надвисоких частот”: Уклад.: В.І. Молчанов, М.М. Кобак, Д.Д. Татарчук.-К.: ІВЦ „Видавництво „Політехніка” ”, 2007.-41 с.

Зміст посібника відповідає програмі базової вищої освіти з напрямку електроніка

Укладачі:

В.І. Молчанов, к.т.н., доц.

М.М. Кобак, к.т.н., доц.

Д.Д. Татарчук, к.т.н.

Відповідальний

Редактор

В.І. Ільченко, к.т.н., доц.

Рецензент:

В.І. Тимофєєв, д.т.н., проф.

Підп. до друку 00.00.06. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Папір друк. №3. Друк офс.

Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. . Зам. № 000. Наклад 100пр.

---

Інформаційно-видавничий центр “Політехніка”

03056, Київ-56, просп. Перемоги, 37

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
Загальні відомості про функціональні елементи НВЧ на основі арсеніду галію.....	6
Властивості напівпровідникових матеріалів мікроелектроніки .....	6
Принцип дії та загальна будова польового транзистора Шотткі.....	8
Теоретична вольт-амперна характеристика .....	9
Еквівалентна схема та параметри польового транзистора Шотткі.....	13
Застосування та функціональні можливості польових транзисторів з бар'єром Шотткі.....	14
Лабораторна робота. Дослідження впливу випромінювання на роботу польового транзистора Шотткі .....	25
Теоретичні відомості.....	25
Особливості впливу випромінювання на напівпровідникові матеріали .....	25
Механізм утворення фото-ЕРС у структурі метал-напівпровідник...27	
Застосування польового транзистора Шотткі як фотоприймача .....	30
Опис лабораторної установки.....	31
Порядок підготовки установки до вимірювань.....	32

Вимірювання коефіцієнта шуму й коефіцієнта підсилення польових транзисторів .....	35
Параметри досліджуваного транзистора: .....	36
Порядок виконання роботи. ....	39
Зміст звіту.....	40
Контрольні запитання .....	40
Список використаної та рекомендованої літератури .....	41

## Вступ

В останні роки все більше використовуються активні пристрої НВЧ діапазону (генератори, підсилювачі і т.д.). Сучасний розвиток техніки зв'язку та радіолокації має явну тенденцію до використання нових більш високочастотних діапазонів хвиль. Це пов'язано з тим, що підвищення частоти електромагнітних коливань призводить до підвищення інформативності переданих сигналів і до зменшення розмірів апаратури й антенних систем.

Одним з основних матеріалів для створення функціональних твердотілих пристроїв НВЧ є арсенід галію (*GaAs*). Він має цілий ряд властивостей, які виділяють його з поміж інших матеріалів. *GaAs* є напівпровідником, у якому яскраво виражений ефект Ганна, досить висока рухливість носіїв, широкий спектр люмінесценції й поглинання, технологія виготовлення твердотілих пристроїв на основі *GaAs* добре відпрацьована. На підкладках з нього створюються елементи із субмікронними розмірами, що дозволяє реалізовувати пристрої з робочими частотами десятки гігагерц.

Одним з найбільш багатofункціональних і перспективних приладів, створених на основі *GaAs*, є польовий транзистор. Тому в даній роботі основна увага приділяється розгляду функціональних властивостей польових транзисторів НВЧ на основі арсеніду галія.

# Загальні відомості про функціональні елементи НВЧ на основі арсеніду галію

## Властивості напівпровідникових матеріалів мікроелектроніки

На сьогоднішній день одним з основних базових елементів твердотільних схем НВЧ є арсенідгалієвий польовий транзистор із затвором Шоттки (ПТШ) [1].

Найбільш істотною перевагою ПТШ у порівнянні з іншими типами НВЧ транзисторів є відсутність *p-n* переходів. Саме використання контакту *Me-n/n* замість *p-n* переходу дозволяє виключити з технологічного процесу операцію дифузії й виготовляти ПТШ із довжиною каналу менш ніж 1 мкм. Виключення з технологічного процесу виготовлення транзисторів операції дифузії, пов'язаної з високотемпературною обробкою матеріалу, відкрило можливість використання для виготовлення ПТШ арсеніду галію (*GaAs*), що має унікальні властивості для створення високочастотних транзисторів. Наприклад, у той час, як розміри приладу зменшуються з метою його поширення в область НВЧ, напруга залишається на рівні, достатньому для одержання необхідної вихідної потужності. Подальше зменшення розміру в напрямку, паралельному електричному полю, пов'язано із значними труднощами через небезпеку настання пробію в напівпровіднику. Відомо, що максимальна частота пропорційна  $E_g V_S$ , де  $V_S$  – швидкість дрейфу носіїв заряду;  $E_g$  – напруженість поля при пробії. Дрейфова швидкість у германії (*Ge*), кремнії (*Si*) і арсеніді галію (*GaAs*) досягає насичення на рівнях  $0,6 \cdot 10^7$ ;  $0,8 \cdot 10^7$ ;  $2 \cdot 10^7$  см/с відповідно, однак поле пробію в *Si* і *GaAs* приблизно в чотири рази вище, ніж в *Ge*.

Інші фізичні властивості напівпровідника, що впливають на параметри транзисторів – рухливість носіїв, діелектрична постійна й теплопровідність. При даних рівнях нагрівання рухливість визначає

опір витоку, стоку й каналу ПТ. Чим менше значення цих параметрів, тим вище коефіцієнт підсилення й нижче рівень шуму транзистора на НВЧ. Виходячи із цих міркувань, *GaAs* *n*-типу є найкращим матеріалом для виготовлення НВЧ-транзисторів, тому що рухливість електрона при слабкому полі для цієї сполуки в 3-4 рази вище, ніж для *Si*. При заданих рівнях легування й прикладених напруг діелектрична постійна  $\epsilon$  визначає ємність, що повинна бути досить малою для роботи на НВЧ. Кремній і арсенід галію мають більш низьку  $\epsilon$ , ніж германій, що дає їм деяку перевагу щодо цього. Для відводу теплоти, що виділяється в транзисторі, важливо мати гарну теплопровідність, особливо у випадку потужних приладів, тільки у цьому *GaAs* поступається *Si*. Основні властивості матеріалів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Властивості напівпровідникових матеріалів мікроелектро-ніки [2, 3].

Властивість	<i>GaAs</i>	<i>Si</i>	<i>Ge</i>
Ширина забороненої зони, еВ	1,43	1,12	0,66
Рухливість електронів (при T=300 К), см/(В·с)	9500	1400	3900
Рухливість дірок (при T=300 К), см/(В·с)	2500	480	1900
Дрейфова швидкість насичення електронів, см/с	$2 \cdot 10^7$	$0,8 \cdot 10^7$	$0,6 \cdot 10^7$
Електрична міцність, В/см	$3,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot 10^5$
Питома теплопровідність	0,46	1,45	-
Період кристалічної решітки, нм	0,565	0,542	0,566
Густина, г/см	5,32	2,33	5,32
Низькочастотна відносна діелектрична проникність	13,1	12,5	16

## Принцип дії та загальна будова польового транзистора Шотткі

Загальна будова польового транзистора Шотткі (ПТШ) показана на рис.1. Він являє собою провідний канал із двома омичними контактами – стоком і виток. Коли на стік подана позитивна напруга щодо витку  $U_{ce}$ , електрони в каналі переміщуються від витка до стоку. Третій електрод структури – затвор, утворює випрямлюючий перехід з каналом.

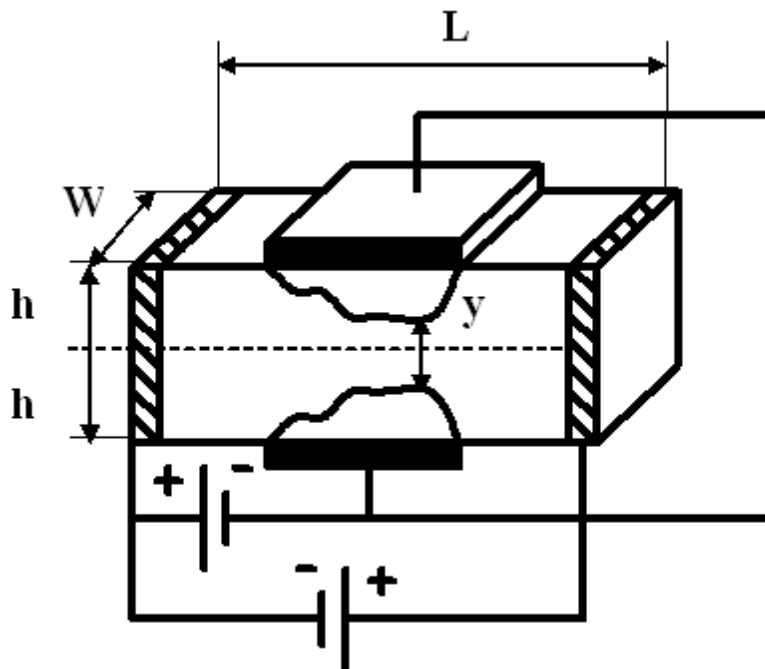


Рис 1. Будова польового транзистора

Прикладаючи між затвором і витком зворотню напругу  $U_{зв}$ , можна змінювати ширину збідненого шару під затвором. При цьому перехід, проникаючи на більшу або меншу глибину каналу, змінює його товщину  $y$ , а, отже, і його електричну провідність. У результаті буде змінюватися сила струму  $j$ , що протікає по каналу й у вихідному колі транзистора.



## Теоретична вольт-амперна характеристика

Проведемо аналіз вольт-амперних характеристик (ВАХ) довгоканального ( $L \gg h$ ) ПТШ, скориставшись при цьому наступними припущеннями: 1) наближенням плавного каналу; 2) наближенням різкого краю збідненого шару; 3) незалежністю рухливості носіїв струму від електричного поля. З огляду на симетрію приладу (рис.1), розглянемо тільки верхню половину транзистора.

При напрузі сток-виток рівній нулю, товщина каналу  $y$  постійна по всій його довжині й залежить від напруги затвор-виток  $U_{зв}$ .

Товщина каналу

$$y = h - \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_d}(\varphi_k - U_{зв})}, \quad (1)$$

де  $h$  – відстань між металургійними границями  $n$ -шара;  $N_d$  – концентрація донорів у каналі;  $\varphi_k$  – контактна різниця потенціалів на межі  $Me - n/p$ ;  $U_{зв}$  - напруга затвор-виток;  $e$  – елементарний заряд;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність.

Чим більша зворотня напруга затвора  $U_{зв}$ , тим ширше перехід і тонше канал. При деякій напрузі  $U_{зв} = U_{відс}$  канал повністю перекривається і, якщо знехтувати  $\varphi_k$  (тому, що  $\varphi_k \ll U_{відс}$ ), одержуємо:

$$U_{відс} = eN_d h^2 \frac{1}{2\varepsilon}, \quad (2)$$

тоді

$$y = h \left( 1 - \sqrt{\frac{\varphi_k + U_{зв}}{U_{відс}}} \right), \quad (3)$$

а опір каналу ( $R_k$ ):

$$R_k = \frac{\rho l}{w y}.$$

(4)

При подачі позитивної напруги сток-виток  $U_{cv}$  в каналі виникає струм  $I_c$  і вздовж каналу з'являється напруга  $U_x$ , значення якої залежить від відстані до витоків. При цьому на переході з'являється залежна від відстані до витоків напруга, під дією якого товщина каналу стає змінною (рис. 2)

$$y_x = h \sqrt{\frac{\varphi_k + U_{zv} + U_x}{U_{відс}}}.$$

(5)

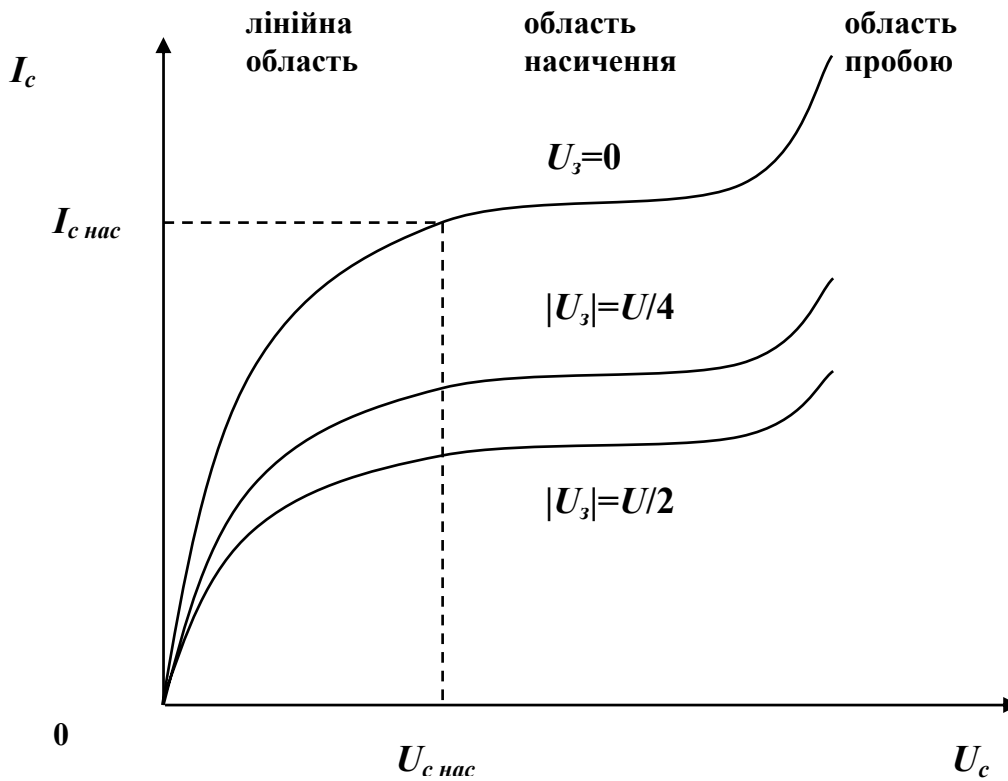


Рис. 2. ВАХ довгоканального ПТШ

При деякому значенні напруги сток-виток  $U_{cv} = U_{нас}$  канал біля стоку повністю перекривається. Визначимо  $U_{нас}$ , поклавши  $U_x = 0$ :

$$U_{нас} = U_{відс} - U_{zv} - \varphi_k.$$

(6)

При такій напрузі через канал проходить максимальний струм стоку

$$I_{c \max} = \frac{U_{\text{нас}}}{R}. \quad (7)$$

На елементарній ділянці каналу  $dx$  спадання напруги

$$dU_x = I_c dR_x = I_c \frac{\rho d\alpha}{y W}, \quad (8)$$

де  $W$  – ширина каналу.

Використовуючи (7) і нехтуючи  $\varphi_k$ , одержуємо

$$\left(1 - \sqrt{\frac{U_{3u} + U_x}{U_{\text{відс}}}}\right) dx = \frac{\rho I_c}{hW} dx. \quad (9)$$

Інтегруючи від  $U_x = 0$  до  $U_x = U_{cв} < U_{\text{нас}}$ ,  $x = 0 \dots L$ , одержуємо

$$I_c = \frac{hW}{\rho L} \left( U_{cв} + \frac{2}{3\sqrt{U_{\text{відс}}}} U_{3в}^{3/2} - \frac{2}{3\sqrt{U_{\text{відс}}}} (U_{3в} - U_{cв})^{3/2} \right). \quad (10)$$

Інтегруючи з урахуванням  $\frac{\rho L}{hW} = R_{\text{ко}}$ , знаходимо силу струму в режимі насичення, тобто при  $U_{cв} = U_{\text{відс}} - U_{3в}$

$$I_c = \frac{U_{\text{відс}}}{3R_{\text{ко}}} \left( 1 - 3 \frac{U_{3в}}{U_{\text{відс}}} + 2 \left( \frac{U_{3в}}{U_{\text{відс}}} \right)^{3/2} \right). \quad (11)$$

Максимальна сила струму стоку при  $U_{3в} = 0$

$$I_{c \max} = \frac{U_{\text{відс}}}{3R_{\text{ко}}}. \quad (12)$$

З урахуванням (12) формула (11) має вигляд

$$I_c = I_{c \max} \left( 1 - 3 \frac{U_{3в}}{U_{\text{відс}}} + 2 \left( \frac{U_{3в}}{U_{\text{відс}}} \right)^{3/2} \right). \quad (13)$$

Вираз (13) є основним рівнянням польового транзистора, він був виведений в 1952 р. Шоклі, що запропонував даний прилад.

Даний вираз справедливий для довгоканальних польових транзисторів ( $L \gg h$ ). Характеристику таких приладів дає співвідношення (13). Однак експериментальні характеристики

польових транзисторів з короткими каналами істотно відрізняються від результатів наближеної теорії. Однією з головних причин такої відмінності є залежність рухливості носіїв струму від електричного поля, що приводить до насичення дрейфової швидкості при більших значеннях поля. Залежність дрейфової швидкості від електричного поля в *Si* і *GaAs* показана на рис.3.

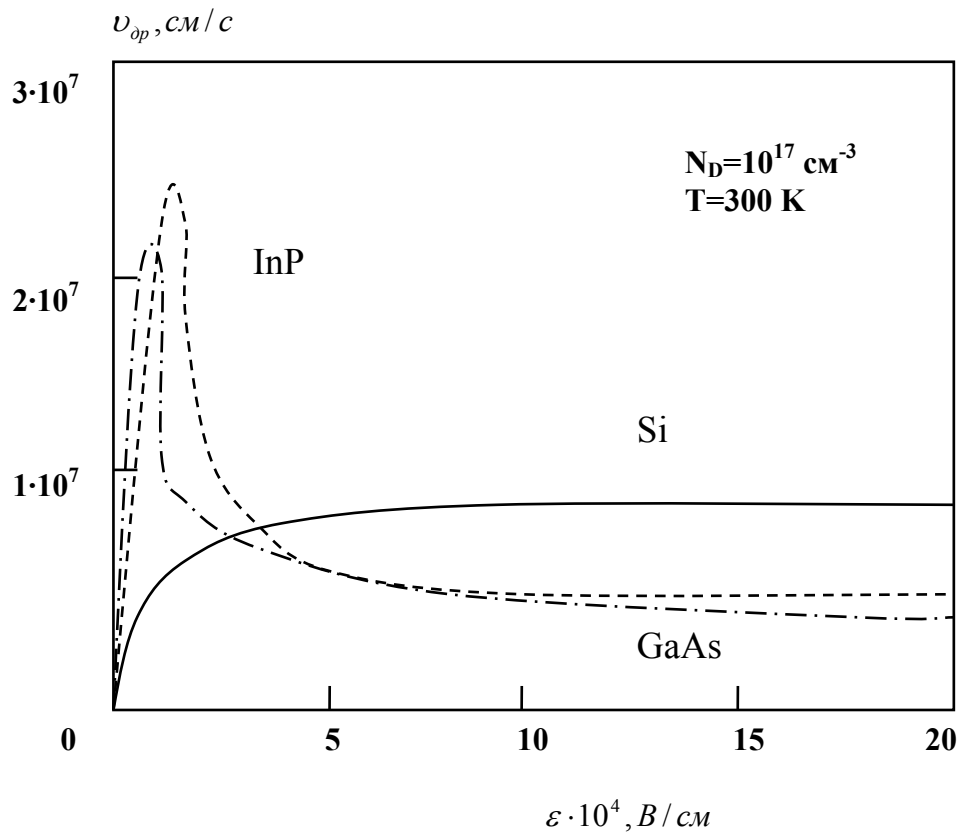
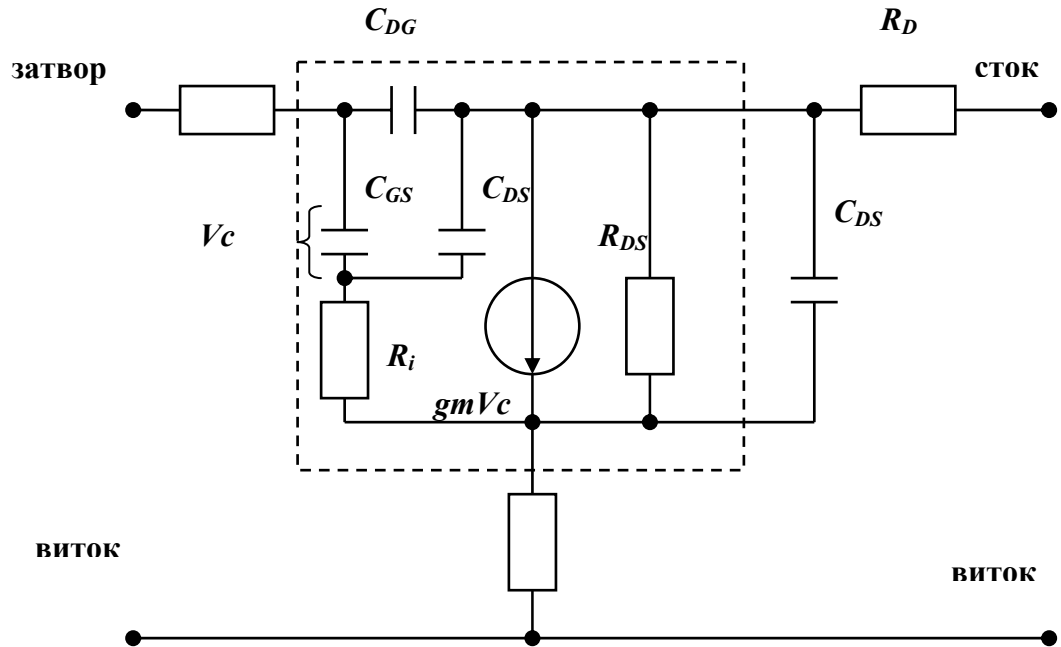


Рис.3. Залежність дрейфової швидкості від електричного поля в *Si* і *GaAs*

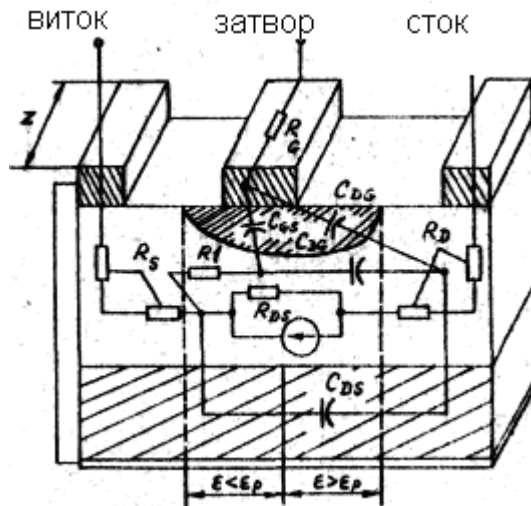
Врахування даної залежності приводить до ускладнення розрахункової формули. Крім того, у приладах з коротким каналом, особливо при великих напругах на стоці, починають домінувати двовимірні ефекти, які важко врахувати аналітично.

## Еквівалентна схема та параметри польового транзистора Шотткі

Для розрахунку різних пристроїв на НВЧ використовують малосигнальну еквівалентну схему ПТШ (рис. 4).



(a)



(б)

Рис.4. Еквівалентна електрична схема ПТШ (а) і фізичні елементи структури, що відповідають елементам еквівалентної електричної схеми (б)

## Основні параметри ПТШ

Крутість – визначає керуючу дію затвора й чисельно дорівнює зміні сили струму при зміні напруги затвора на 1 В, тобто:

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зв}} \text{ при } U_{св} = const.$$

З урахуванням (13) знаходимо

$$S = \frac{2I_{c \max}}{U_{відс}} \left( 1 - \frac{U_{зв}}{U_{відс}} \right) = \frac{2}{3R_{ко}} \left( 1 - \frac{U_{зв}}{U_{відс}} \right). \quad (14)$$

Коефіцієнт підсилення, дорівнює відношенню збільшення напруги на стоці й збільшення напруги на затворі при постійному  $I_c$ :

$$\mu = \frac{\partial U_{св}}{\partial U_{зв}} \text{ при } I_c = const. \quad (15)$$

Якщо

$$\partial U_{св} = \frac{\partial I_c}{G_{вих}}, \quad \partial U_{зв} = \frac{\partial I_c}{S},$$

то

$$\mu = \frac{S}{G_{вих}} = SR_i. \quad (16)$$

## Застосування та функціональні можливості польових транзисторів з бар'єром Шотткі

### Підсилювачі

Невеликий коефіцієнт шуму й малі нелінійні спотворення ПТШ пояснюють їх широке застосування в лінійних підсилювачах. Можна виділити дві групи підсилювачів: лінійні малошумлячі й лінійні підсилювачі потужності.

Малошумлячі підсилювачі на ПТШ будуються на базі схем включення транзисторів із загальним витоком (рис.5), тому що ця схема має найбільше посилення при мінімумі шумів.

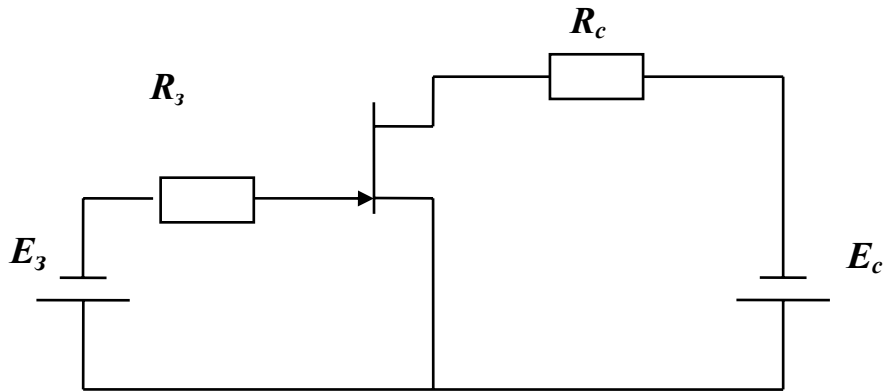


Рис.5. Схема включення ПТШ із спільним витоком

Для схем з ЗВ можна записати

$$U_{ce} = \varepsilon_{ce} - RI_c. \quad (17)$$

Знайдемо коефіцієнт підсилення  $K_{ніdc}$  для даної схеми:

$$K_{ніdc} = -\frac{\partial U_{ce}}{\partial U_{3б}} = -R \frac{\partial I_c}{\partial U_{3б}} = -RS. \quad (18)$$

Таким чином, щоб отримати більше підсилення необхідно мати більшу крутість і більший опір навантаження, однак величина останнього обмеженаою шунтувальною дією ємностей транзистора (особливо на високих частотах). Тому формула для строгого розрахунку  $K_{ніdc}$  на ВЧ досить складна й тут не приводиться.

У ПТШ робочий перехід утворюється безпосередньо під поверхнею електрода затвора й тому має значно меншу площу бічної поверхні електрода, що приводить до зниження ємності  $C_{e2}$ . Польові транзистори з металонапівпровідниковим затвором завдяки малій прохідній ємності й малим розмірам електродів мають високі граничні частоти підсилення, що сягають 50...80 ГГц.

Крім того, ПТШ мають більш низькі шуми, ніж інші види транзисторів, особливо в діапазоні вище 6 ГГц.

Малошумлячі підсилювачі (МШП) НВЧ зазвичай використовують у вхідних колах приймачів для підсилення вхідного сигналу без спотворення закладеної в цьому сигналі інформації. До МШП висувають такі вимоги: збереження працездатності в необхідній смузі робочих частот, низький коефіцієнт шуму, великий динамічний діапазон, низький коефіцієнт стоячої хвилі КСХ, мала нерівномірність АЧХ, висока лінійність ФЧХ, стабільність параметрів при зміні зовнішніх умов (температури, радіації й т.д.)

### **Основні параметри НВЧ МШП**

Робочий діапазон частот – це діапазон, у якому підсилювач забезпечує параметри не гірше заданих величин. Робочий діапазон задається граничними частотами: мінімальною  $f_n$  і максимальною  $f_e$ . Смуга частот обчислюється щодо середньої частоти діапазону:

$$\Delta f = 2 \frac{f_e - f_n}{f_e + f_n} \cdot 100\%.$$

Коефіцієнт шуму – величина, що показує в скільки разів зменшується відношення потужностей сигнал/шум на виході в порівнянні із входом через власні шуми підсилювача:

$$K_{ш} = \frac{(P_c/P_{ш})_{ex}}{(P_c/P_{ш})_{вх}}.$$

Коефіцієнт шуму можна вимірювати в децибелах (дБ), а також шумовою температурою (особливо при малих величинах) у градусах Кельвіна:

$$T_{ш} = 290(K_{ш} - 1).$$

Гранична чутливість  $P_{гр}$  – вхідна потужність, при якій забезпечується перевищення рівня потужності на виході підсилювача над рівнем власних шумів в 2 рази, вимірюється в децибелах на Вт.

Номинальний коефіцієнт підсилення:

$$K_{н\text{дс}} = \frac{P_{вх.ном}}{P_{ген.ном}},$$



де  $P_{вих.ном}$  – максимальна потужність, що віддається підсилювачем в узгоджене вихідне навантаження:  $\dot{Z}_н = \dot{Z}_{вих.підс.}^*$ .  $P_{ген.ном}$  – максимальна потужність генератора, що віддається їм у узгоджене навантаження:  $\dot{Z}_{ген} = \dot{Z}_{у.н}$ , при цьому не обов'язково  $\dot{Z}_{у.н} \neq \dot{Z}_{вих.підс.}$ .

Фактичний коефіцієнт підсилення:

$$K_{підс.ф.} = \frac{P_{вих.}}{P_{вх.}},$$

де  $P_{вих}$  – потужність на виході підсилювача, що віддається в реальне навантаження;  $P_{вх}$  – потужність, що поглинається у вхідному колі;

Максимальний коефіцієнт підсилення:

$$K_{підс.макс} = \frac{P_{вих.ном.}}{P_{вх.ном.}},$$

де  $P_{вх.ном.}$  – максимальна потужність, що віддається генератором у погоджене навантаження  $\dot{Z}_{ген} = \dot{Z}_{вих.підс.}^*$ , причому  $\dot{Z}_{у.н} = \dot{Z}_{вих.підс.}$ .

На сьогоднішній час створено МШП НВЧ із дуже різноманітними параметрами: підсилювачі мають робочі частоти 1...40 ГГц, зі смугою частот від 1...2 до 40 %; залежно від призначення підсилювача коефіцієнт шуму в сучасних підсилювачах знижений до 3 дБ, а коефіцієнт підсилення по потужності досягає 20 дБ.

### **Підсилювачі потужності**

Останнім часом велика увага починає приділятися розробці потужних ПТШ на основі *GaAs*. Це пов'язане з тим, що ПТШ – триполюсний прилад зі слабким зворотним зв'язком, що забезпечує високу ізоляцію виходу від входу. Остання обставина є основною перевагою ПТШ перед ЛПД, інжекційно-пролітними діодами й діодами Гана.

Аналіз звичайної структури ПТШ показує, що вона не є оптимальною для потужних транзисторів. Концентрація домішок в епітаксiальному шарі звичайно дорівнює  $10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Така висока

концентрація дає можливість одержати велике значення  $S$ , але приводить до зменшення напруги пробою, що становить 5...10 В (рис.6). Введення шару з малою концентрацією домішки в структуру ПТШ для збільшення напруги пробою поліпшує коефіцієнт підсилення по потужності, тому що вихідна ємність зменшується.

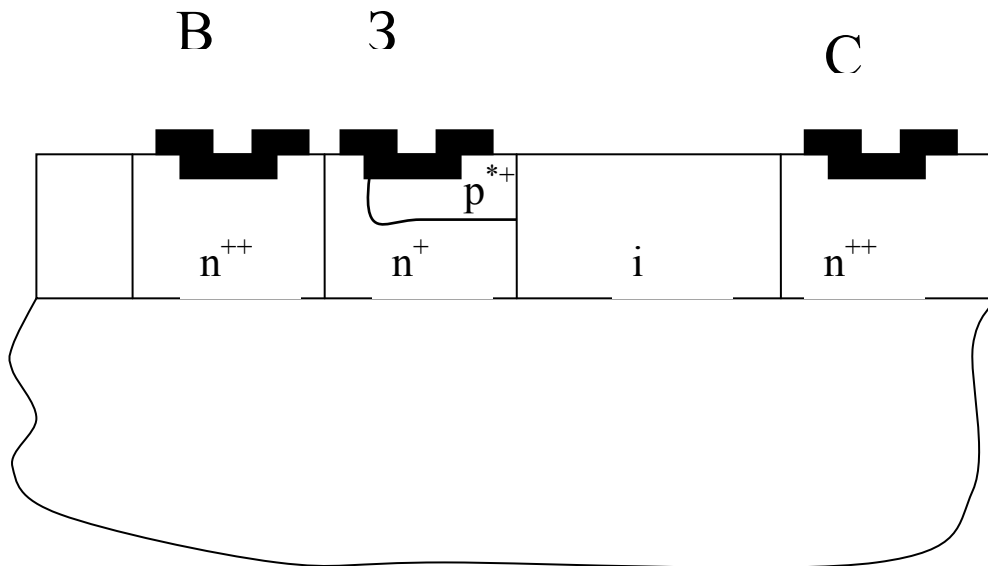


Рис. 6. Структура ПТШ із  $i$ -шаром

### Інші види підсилювачів

Подальші дослідження привели до створення польових транзисторів із двома затворами, які (рис.7) у порівнянні з одностаторними транзисторами мають підвищену функціональну здатність і менше значення зворотного зв'язку (збільшуючого коефіцієнт підсилення по потужності й коефіцієнт стійкості), але більший коефіцієнт шуму. Однак розрахунок показує, що при використанні епітаксіального шару різної величини вдається значно знизити коефіцієнт шуму  $K_{ш}$  і підвищити коефіцієнт підсилення  $K_{ндс}$ . Крім того, у цьому випадку коефіцієнт стійкості більше одиниці.

Переваги такого транзистора – можливість регулювання підсилення шляхом подачі напруги зміщення на один із затворів;

динамічний діапазон такого регулювання 35 дБ. Подібні транзистори застосовуються в каскадах посилення проміжної частоти, де вимоги до шумів знижені, а основним є одержання найбільшого підсилення (часто необхідне застосування АРП).

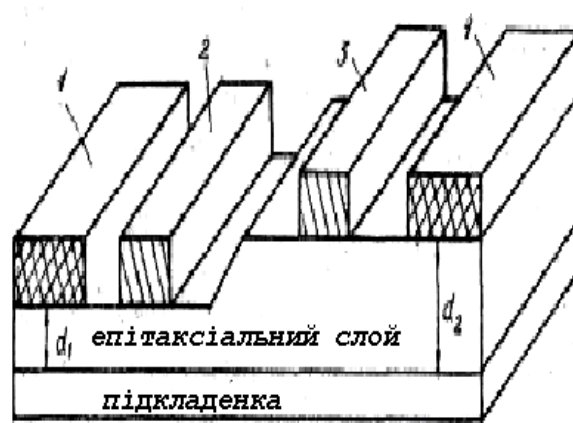


Рис.7. Структура двозатворних ПТШ:  
1 - витік; 2 - затвор 1; 3 - затвор 2; 4 - стік

В *GaAs* структурах за рахунок міждолинного переносу носіїв можливе створення хвиль просторового заряду. Таким чином, вхідний сигнал високої частоти може переноситися дрейфуючим просторовим зарядом і підсилюватися до значення, що перевищує граничне, коли в напівпровіднику буде створюватися умова негативної диференціальної рухливості. На цьому принципі будуються твердотілі підсилювачі біжучої хвилі. Поліпшення параметрів таких підсилювачів може бути отримане на основі структури, що є комбінацією ПТШ і підсилювача біжучої хвилі.

У такому транзисторі біжучої хвилі через бар'єр Шоттки здійснюється керування хвилями просторового заряду в епітаксiальній плівці (рис.8).

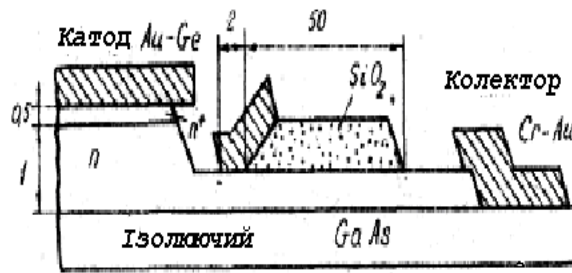


Рис. 8. Транзистор біжучої хвилі

На підсилювачі було отримано смугу підсилюваних частот 8...16 ГГц.

## Генератори

ПТШ стали використовуватися для створення НВЧ генераторів зовсім недавно. Однак перші досліді говорять, що й у цій області ПТШ володіє рядом чудових властивостей, У ПТШ поєднані переваги генераторів на діодах Ганна й ЛПД: низька напруга живлення й високий ККД(коефіцієнт корисної дії). Високоякісний ПТШ має мале значення внутрішнього зворотного зв'язку. Це спрощує створення на його основі генератора (необхідний зворотний зв'язок створюється зовнішнім колом, що досить легко розраховується). Структурна схема одного з варіантів генератора показана на рис.9.

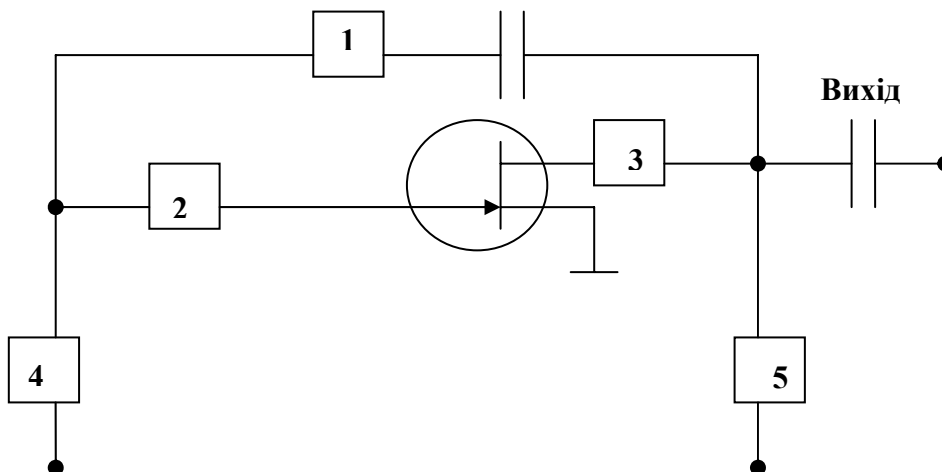


Рис.9. Структурна схема НВЧ генератора на основі ПТШ: 1 - коло зворотного зв'язку; 2, 3 - узгоджуючі кола; 4, 5- фільтри подачі змішання

Малопотужні генератори на ПТШ застосовуються для збудження низькорівневих балансових змішувачів. Для підвищення потужності генераторів на ПТШ збільшують ширину затвора. Так, при використанні польового транзистора із шириною затвора 7500 мкм було отримано вихідну потужність 1 Вт на частоті 10 ГГц, що порівняно з потужністю генераторів на діоді Ганна.

### **Змішувачі**

У теперішній час польові транзистори з затвором Шотткі в діапазоні частот вище 6 ГГц мають незаперечні переваги перед біполярними транзисторами: низький  $K_{ш}$ , значно більшу максимальну частоту, великий динамічний діапазон, низькі інтермодуляційні спотворення, можливість одержання посилення при перетворенні. Ці переваги спонукали розроблювачів досліджувати можливість побудови змішувачів НВЧ діапазону, на основі ПТШ. Напряга зміщення польового транзистора виробляється сигналом гетеродина, що прикладається до затвора й модулює крутість прибору періодично. Структурна схема змішувача на ПТШ показана на рис.10.

Крім того, використовуючи симетрію транзистора, тобто взаємозамінність у деяких випадках стоку й витоку, можна сполучити в одному пристрої функції змішувача й модулятора. Напрямок проходження сигналу по такому пристрою змінюють комутуючи напруги живлення. Особливо доцільно застосовувати такі змішувачі-модулятори в тракті приймально-передавальних пристроїв. Можливі схеми показані на рис.11 і 12.

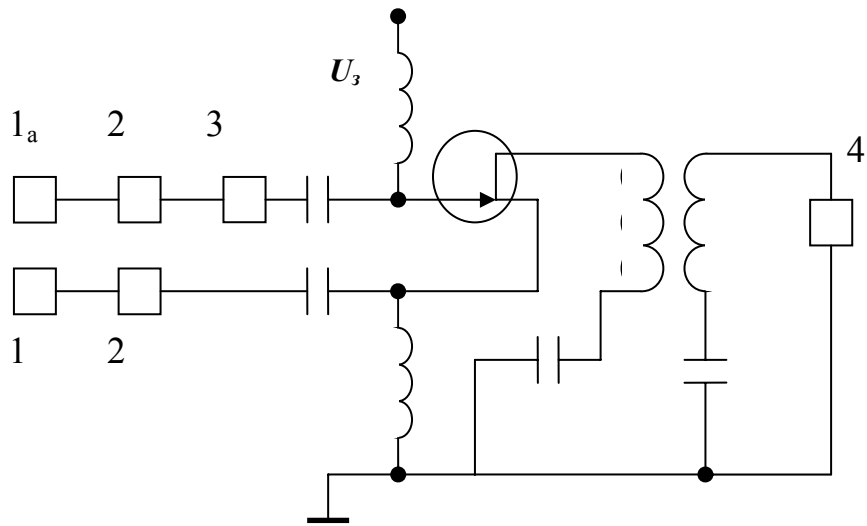


Рис. 10, Змішувач на ПТШ: 1а - гетеродин; 1б - генератор сигналу; 2 - вентиль; 3 – узгоджуючі кола; 4 - аналізатор спектру

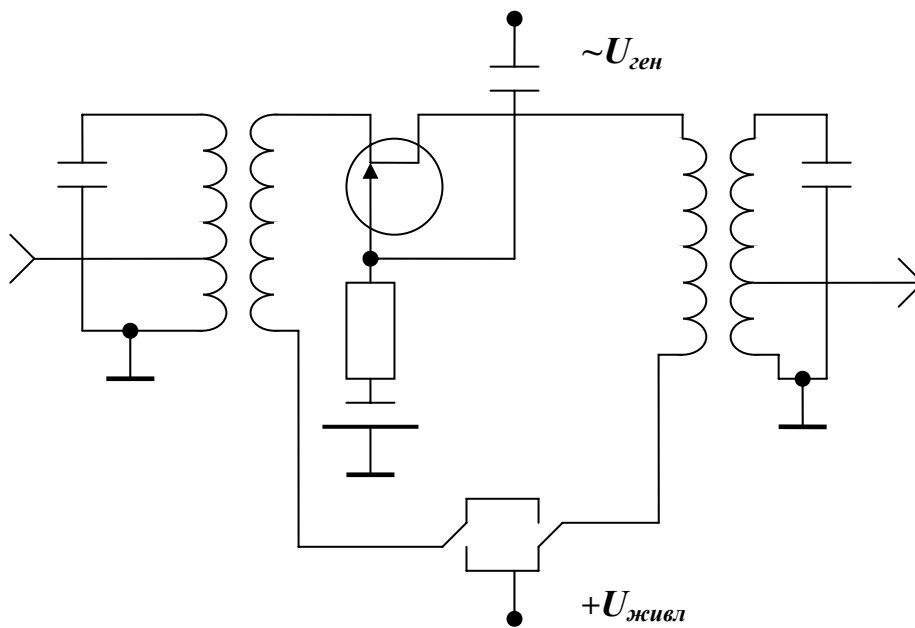


Рис.11. Змішувач-Модулятор

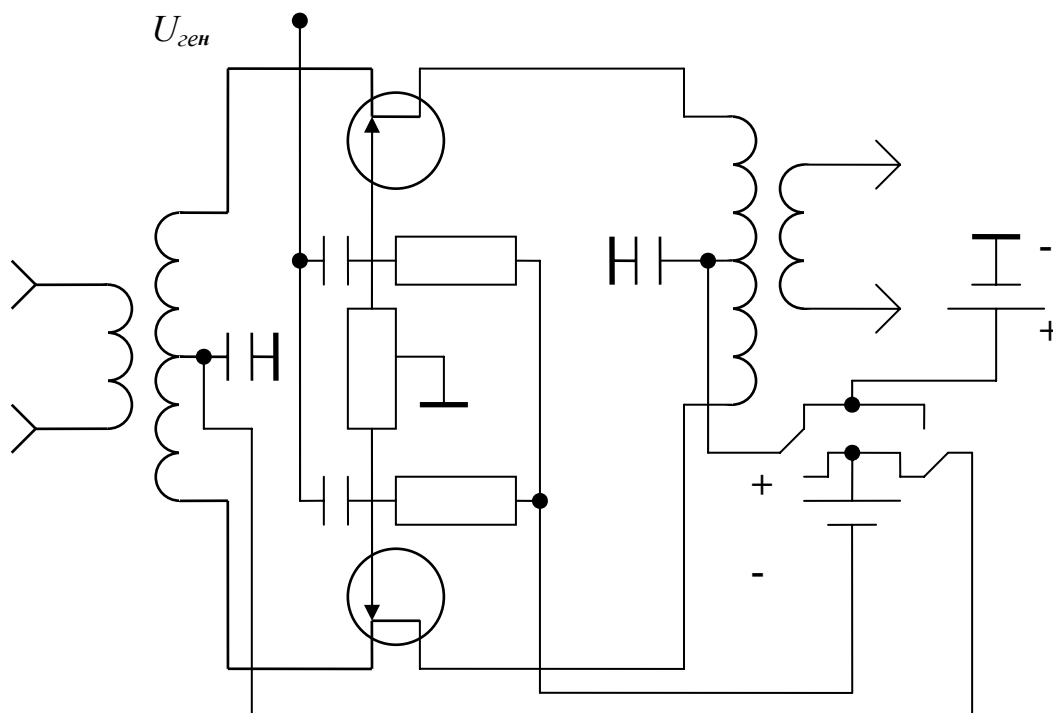


Рис.12. Балансовий змішувач-модулятор

### Інші застосування ПТШ

Хоча насамперед ПТШ являють собою підсилювальний, активний прилад, його також широко використовують і в інших випадках.

Можливе використання ПТШ як резистора. У цьому випадку на затвор подається напруга зміщення, що і визначає номінал резистора. Таким чином, ПТШ служить змінним опором, керованим напругою на затворі.

Транзистор при зворотному зміщенні робочого переходу може використовуватися як конденсатор або варикап. Використовуючи перехід транзистора, неважко реалізувати спрямлюючі діоди. В МІС НВЧ ПТШ використовуються як узгоджуючі кола у підсилюючих каскадах. Вельми перспективною галуззю застосування ВЧ ПТШ на *GaAs* можна вважати використання цих транзисторів в якості

перемикачів середньої потужності для систем зв'язку з високою швидкістю передачі даних (порядка гигабіт).

Крім того, ПТШ становлять основу розроблювальних зараз цифрових надшвидкодійних ВІС на *GaAs*. Уже досягнута швидкодія  $4 \cdot 10^9$  біт/с. Зокрема, у найпростіших тригерах на ПТШ при  $T = 77^\circ K$  час перемикання становить  $\sim 17$  нс, що близько до швидкодії переходів Джозефсона при гелієвих температурах.

При розробці пристроїв на ПТШ виникли труднощі, пов'язані із широко смужним узгодженням вхідних і вихідних кіл транзистора, створенням кіл настроювання, живлення й зміщення. Тому що всі ці ланцюги пов'язані із ПТШ, вони вносять значні паразитні ємності в схему, погіршуючи її властивості. Значно зменшити ці ємності можна ізоляцією вхідних та вихідних кіл від транзистора. Одним з методів ізоляції є зміна характеристик транзистора (його підстроювання) під дією випромінювання. Цим методом можна спростити деякі із зазначених вище кіл і здійснювати настроювання пристрою в широких межах.



# **Лабораторна робота. Дослідження впливу випромінювання на роботу польового транзистора Шотткі**

**Мета роботи** – ознайомитися з функціональними можливостями арсенідгалієвого польового транзистора НВЧ із затвором Шотткі, вивчити принцип його роботи й основні параметри, дослідити вплив лазерного випромінювання на характеристики транзистора, навчитися вимірювати коефіцієнт підсилення й коефіцієнт шуму активних чотириполюсників НВЧ.

## **Теоретичні відомості**

### **Особливості впливу випромінювання на напівпровідникові матеріали**

Студент зобов'язаний знати, що при опроміненні напівпровідника світлом частина світлової енергії відбивається від його поверхні, частина поглинається й частина проходить через структуру напівпровідника. Впливати безпосередньо на напівпровідник буде тільки та частина світлової енергії, що була поглинена їм.

Спектр оптичного поглинання напівпровідника (залежність від довжини хвилі світла  $\lambda$ ) визначається характером та концентрацією поглинаючих центрів. Центрами поглинання можуть бути вільні та зв'язані електрони тіла, а також кристалічна решітка. На рис.13 зображений спектр поглинання напівпровідника та позначені основні смуги поглинання.

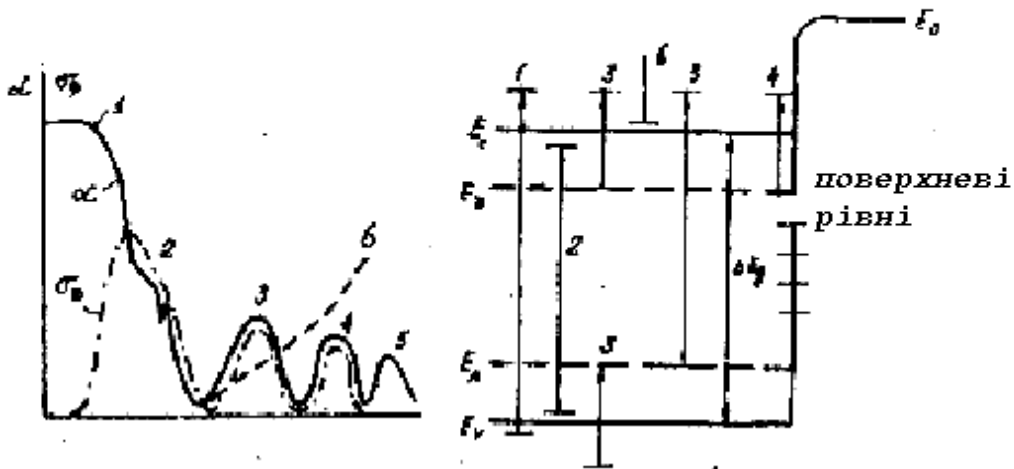


Рис. 13. До теорії оптичного поглинання n/п.

А. Власне поглинання пов'язане з переходом електронів з валентної зони в зону провідності за рахунок енергії квантів випромінювання. Для здійснення такого переходу енергія кванта повинна перевищувати ширину забороненої зони  $h\nu > \Delta E_g$  (область 1). Власне поглинання дає суцільний спектр, обмежений досить крутим краєм кривої показника поглинання при  $h\nu_{zp} > \Delta E_g$ , за межею якого матеріал відносно прозорий.  $\nu_{zp}$  лежить у видимій або ІЧ частині спектра залежно від ширини забороненої зони.

Б. Ексітонне поглинання (область 2). В області частот, близьких до  $\nu_{zp}$ , можливе збудження електрона валентної зони, при якому він не переходить у зону провідності, а утворює із діркою зв'язану систему за рахунок сили кулонівського притягання (ексітон). Ексітон, будучи нейтральним, не збільшує провідності кристала, однак непрямий вплив на неї робить, тому що, зіштовхуючись із дефектом решітки, він може або дисоціювати із утворенням вільних носіїв заряду, або рекомбінувати. Спектр подібного поглинання має вигляд гострого

селективного піка для напівпровідників із прямим переходом і сходи - для напівпровідників з непрямым переходом.

В. Домішкове поглинання (області 3, 4) обумовлено збудженням носіїв через домішкові або поверхневі рівні. Для іонізації домішки потрібна витрата невеликої енергії, тому область домішкового поглинання зміщена до ІЧ області спектра. Коефіцієнт домішкового поглинання на кілька порядків нижче коефіцієнта власного поглинання, тому що щільність домішкових станів набагато нижче щільності станів у зонах.

Г. Частина енергії випромінювання може витрачатися на збільшення коливальної енергії решітки. При цьому з'являються вузькі смуги поглинання в ІЧ частині спектра (область 5).

Д. Енергія випромінювання може поглинатися вільними носіями заряду в зоні провідності й валентній зоні. Коефіцієнт поглинання невеликий через малу концентрацію вільних носіїв у напівпровіднику.

### **Механізм утворення фото-ЕРС у структурі метал-напівпровідник**

Студент зобов'язаний знати, що власне й домішкове поглинання випромінювання напівпровідниками створює тільки надлишкову нерівноважну концентрацію вільних носіїв заряду. Для виникнення фотоЕРС необхідний поділ у просторі позитивних і негативних носіїв заряду. Особливо ефективний поділ нерівноважних носіїв заряду спостерігається в неоднорідних напівпровідниках з електронно-дірковим або поверхнево-бар'єрним переходом (контакт Шотткі).

Контакт Шотткі утвориться в приповерхньому шарі напівпровідника, що перебуває в безпосередньому контакті з металом, якщо у металу термоелектронна робота виходу  $e\phi_M$ , більша за роботу виходу напівпровідника  $e\phi_n$  (рис.14).

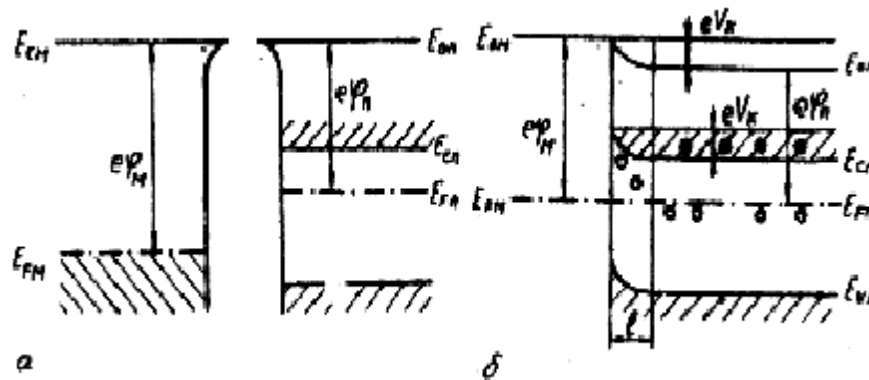


Рис. 14. Діаграми контактів  $n/n$ - $Me$

У приконтактному шарі напівпровідника виникає позитивний об'ємний заряд за рахунок відходу електронів із цього шару в метал. У результаті приконтактний шар збіднюється основними носіями заряду, опір його перевищує опір об'єму напівпровідника й у поверхні напівпровідника утвориться збіднений шар. Рівень Фермі в цьому шарі напівпровідника опускається. Оскільки в рівноважному стані рівні Фермі в напівпровіднику й у металі повинні збігатися, у збідненому шарі відбувається викривлення енергетичних зон і утворюється потенційний бар'єр, рівний контактній різниці потенціалів  $e\varphi_k$ , причому

$$e\varphi_k = e\varphi_M - e\varphi_n.$$

Процеси, що приводять до поділу нерівноважних носіїв і створенню фотоЕРС, залежно від енергії фотонів пов'язані із збудженням нерівноважних носіїв заряду з різних областей структури. При опроміненні структури фотонами з енергією  $h\nu_1 \geq e\varphi_{MH}$ , де  $\varphi_{MH}$  – енергія, яку необхідно затратити на перенос електрона з рівня Фермі металу на дно зони провідності напівпровідника в контакті, відбувається оптичне збудження електронів металу – процес 1 (рис.15). Збуджені електрони, рухаючись у всіх напрямках, можуть

увійти в напівпровідни, що буде заряджатися негативно. На бар'єрі виникає фотоЕРС.

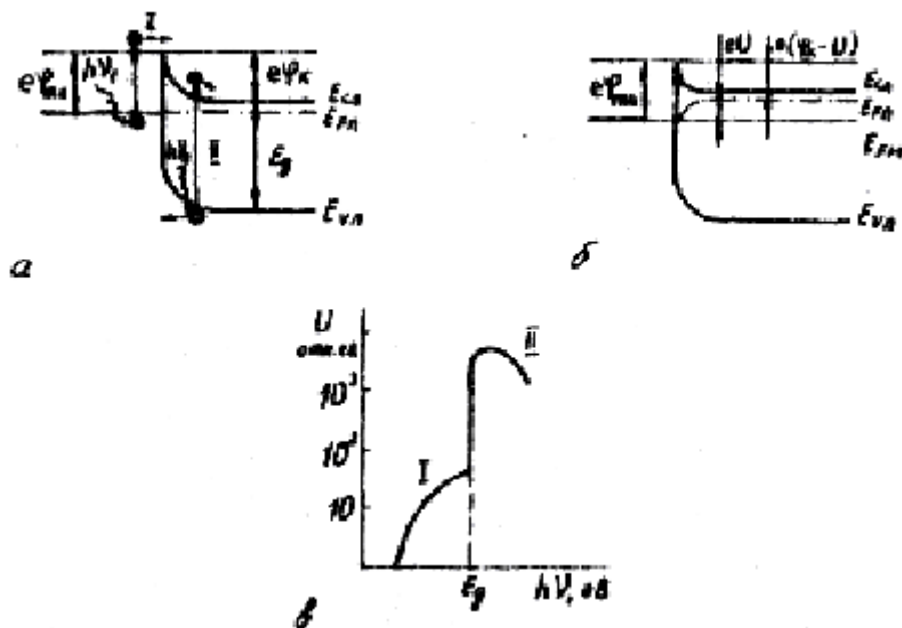


Рис. 15. Енергодіаграми й графіки залежності фотоЕРС від енергії падаючого фотона.

При опроміненні структури фотонами з енергією  $h\nu \geq E_g$  генеруються електронно-діркові пари, збуджені в межах бар'єра Шотткі й на відстані дифузійної довжини від нього, розділяються контактним полем і створюють фотоЕРС  $U$ . Типова залежність фотоЕРС від енергії фотона для напівпровідника із прямими переходами показана на рис.15в. Видно, що внесок у фотоЕРС, пов'язаний з фотоефектом з металу в напівпровідник, приблизно на два порядки менше внеску, обумовленого генерацією електронно-діркових пар. При більших енергіях фотонів, коли пари електрон-дірка генеруються дуже близько до межі розділу (структура опромінюється з боку металу), фотоЕРС зменшується за рахунок впливу поверхневої рекомбінації. Реально існуючі фотодіоди з бар'єром Шотткі при роботі з монохроматичним випромінюванням мають постійну часу порядку  $10^{-10}$  і наближаються до теоретичної

межі фоточутливості для фотодіодів ( $S \approx 0,5 \text{ А/Вт}$ ). У точкових фотодіодів з бар'єром Шотткі верхня межа частоти досягає 40 ГГц.

### Застосування польового транзистора Шотткі як фотоприймача

Головною перевагою такого приладу є внутрішнє посилення фотосигналу.

Перехід затвор-канал можна розглядати як фотодіод, фотострум якого викликає на опорі  $R_3$  спадання напруги, пропорційне рівню збудження (рис.16).

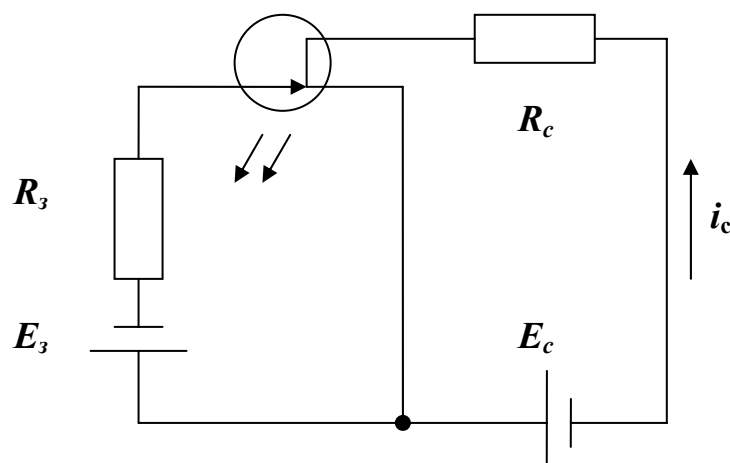


Рис.16. Схема включення ПТШ як фотоприймача

Це

призводить до модуляції потенціалу затвора:

$$U_3 = E_3 - i_{\phi_3} R_3, \quad (19)$$

де  $i_{\phi_3}$  – фотострум переходу затвор-канал.

При цьому фоточутливість ПТШ

$$S_{\phi} = S_{\phi_0} \frac{R_3 R_{i3}}{R_3 + R_{i3}},$$

де  $S_{\text{фд}}$  – фоточутливість діода;  $S_{\text{ф}}$  – крутість транзистора;  $R_3$  – опір у колі затвора;  $R_{i3}$  – внутрішній опір затвора.

Польові фототранзистори є високочутливими фотоприймачами. Фоточутливість становить 20...400 А/Вт.

Інерційність визначається інерційністю фотодіода й часом прольоту носіїв через канал.

### Опис лабораторної установки

Структурна схема вимірювальної установки зображена на рис. 17.

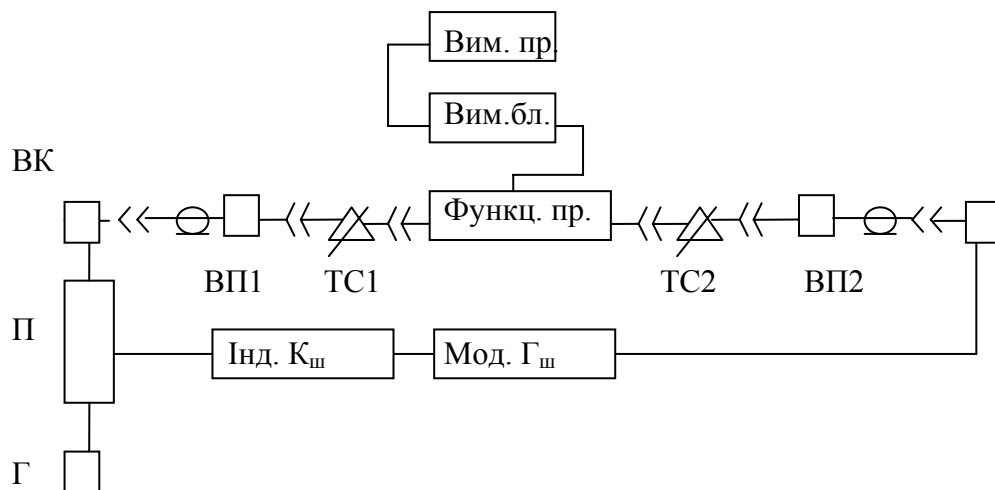


Рис.17. Схема вимірювання підсилювальних і шумових параметрів функціонального пристрою.

Установка являє собою супергетеродинний приймач високої чутливості із проміжною частотою 2 МГц. Джерелом шуму є лавино-пролітний діод, спектральна щільність потужності шумів якого може змінюватися залежно від сили струму, що протікає через нього. Сигнал з генератора шуму (ГШ) частотою 0,18...4 ГГц надходить на досліджуваний транзистор, поміщений у спеціальний тримач, підсилюється, надходить на перетворювач, змішується із сигналом

гетеродина, перетворюється в сигнал частотою 2 МГц і надходить на індикатор коефіцієнта шуму (ІКШ). Для узгодження транзистора з вимірювальним трактом застосовуються вхідні й вихідні узгоджуючі трансформатори. Блок режимів забезпечує транзистор напругами живлення, які подаються через спеціальні втулки живлення.

Як зовнішній гетеродин застосовуються генератори типів Г4-120, Г4-121, Г4-122, при вимірюванні на фіксованих частотах 1.0 або 2,25 ГГц – гетеродина із комплекту індикатора коефіцієнта шуму.

## **Порядок підготовки установки до вимірювань**

### 1. Індикатор коефіцієнта шуму:

- встановити вертушку в положення "Кр";
- натиснути кнопки: "2МН", "F", "∇", "v", "xI", "100", "IS" і кнопки "IV", "ПРЕДЕЛЫ КАЛИБРОВКИ" - на задній панелі;
- встановити ручки в крайнє ліве положення, крім ручок під шліц, що відносяться до кнопки " $F_K$ ", позначених символами "∇" та "∇∇", які повинні бути в крайньому правому положенні;
- включити тумблером "Сеть" живлення індикатора, при цьому повинна засвітитися лампочка індикації включення мережі й лампочка над цифрою "25" вертушки.

### 2. Модулятор генератора шуму:

- натиснути кнопки "НЕПР.РЕЖ.", "10";
- встановити ручки під шліц "∇", "∇∇" у крайнє ліве положення;
- включити кнопкою "Сеть" напругу живлення модулятора, при цьому повинна засвітитися лампочка індикації включення мережі.



### 3. Блок режимів:

- натиснути кнопки "ВЧ", "П", "0" перемикачів  $U_D$ ,  $U_C$ ,  $U_G$ ,  $U_B$ , кнопку подачі живлячих напруг на транзистор "ВКЛ" поставити у віджате (виключене) положення;
- включити тумблером "СЕТЬ" напругу живлення, при цьому повинна засвітитися лампочка індикації включення мережі.

### 4. Генератор шуму(ГШ).

Після 15-хвилинного прогріву всіх блоків встановити струм генератора шуму (ГШ):

- натиснути кнопку "I<sub>ГШ</sub>" в ІКШ;
- у модуляторі ГШ за допомогою ручок під шліц "∇", "∇∇" по стрілці приладу ІКШ встановити струм ГШ, зазначений у графіку калібрування ГШ ( $I_{непр} = 6$  мА), після чого в модуляторі ГШ натиснути кнопку "ВНІШ.МОД." а в індикаторі коефіцієнта шуму – кнопку "IS".

### 5. Перетворювач.

Встановити необхідну частоту вимірювання (гетеродин з комплекту ІКШ або частоту по генератору). Для цього ручкою під шліц "НАСТРОЙКА" перетворювача встановити по шкалі необхідну частоту, на цю ж частоту настроїти гетеродинний генератор. При цьому він повинен працювати в режимі безперервної генерації, а рівень виходу повинен бути мінімальним (ручка "РЕГУЛЯТОР ВИХОДА" у лівому положенні до упору).

Перевірити струм змішувача, для чого в ІКШ натиснути кнопку "I<sub>см</sub>" й ручкою " РЕГУЛЯТОР ВИХОДА " гетеродинного генератора встановити такий рівень виходу, при якому стрілка вимірювального приладу " *FKpI* " відхилилася на 30...40 % шкали при використанні генераторів Г4-120, Г4-121, Г4-122. Після установки струму в ІКШ натиснути кнопку "IS".

Примітка. Перевищення сигналу генератора, при якому стрілка приладу " *FKpI* " відхиляється більш ніж на 70 % шкали, приводить до виходу з ладу змішувальних діодів перетворювача.

6. Вимірювання коефіцієнта шуму вимірювального приладу:

- зонди трансформаторів установити в крайнє верхнє положення;
- вставити замикач у тримач транзисторів;
- в ІКШ вертушку встановити в положення "F" з верхньою межею "100";
- натиснути кнопку "O" та ручками "∇O" і "∇∇" встановити показання вимірювального приладу *FKpI*", рівне відносній шумовій температурі (ВШТ) генератора шуму, зазначеній в графіку калібрування ФШ для цієї частоти. При цьому потрібно користуватися кривою II;
- регулюючи ручкою під шліц "НАСТРОЙКА" у перетворювачі домогтися мінімальних показань стрілки індикаторного приладу. Плавнo змінюючи рівень виходу генератора, домогтися мінімального коефіцієнта шуму. При цьому необхідно, натискаючи кнопку "1см", періодично контролювати струм змішувача, щоб кут відхилення стрілки індикаторного приладу не перевищив 70 % шкали приладу. У правильно настроєному приладі коефіцієнт шуму не повинен перевищувати 15 одиниць.

## Вимірювання коефіцієнта шуму й коефіцієнта підсилення польових транзисторів

1. Прокалібрувати вимірювач для виміру коефіцієнта підсилення потужності:

- вставити перемичку у тримач смужкових транзисторів.

Примітка. При вставленій перемичці кнопка "ВКЛ" блоку режимів повинна перебувати у віджатому (виключеному) положенні.

- установити зонди трансформаторів у крайнє ліве положення, каретки встановити в середнє положення;
- натиснути кнопки " $K_p$ ", "2,5" в ІКШ;
- установити ручками під шліц " $\nabla$ " і " $\nabla\nabla$ ", що стосуються кнопки " $K_p$ ", показання вимірювального приладу "Г" (червона риска).

2. Провести компенсацію власних шумів вимірника:

- натиснути кнопки " $F_K$ " і "Х" в ІКШ;
- виставити ручками " $\nabla$ " і " $\nabla\nabla$ ", що стосуються кнопки " $F_K$ ", показання стрілочного приладу рівним "Г";
- натиснути кнопку " $K_p$ ";
- із тримача транзисторів витягти перемичку.

На цьому калібрування, вимірювача вважається закінченим.

3. Виставити в блоці режимів напругу, необхідну для живлення вимірюваного транзистора, для цього:

за допомогою кнопок, що стосуються перемикача  $U_D$ ,  $U_C$ , виставити межу напруги живлення транзистора в колі стік-витік, а за допомогою потенціометра встановити його точно.

4. Вимірювання коефіцієнта підсилення потужності:

- вставити транзистор у тримач;
- кнопкою "Вкл." включити напругу живлення транзистора.

На вимірювальному приладі  $mA$  стрілка відхилиться, для

зручності відліку користуватися комбінаціями кнопок 3...100 та "X1", "X0,01";

- за допомогою вхідного трансформатора узгодити вхід транзистора так, щоб одержати максимальне підсилення (це досягається при зануренні зонда трансформатора й переміщенні каретки вправо-уліво);
- узгодити вихід транзистора з вихідним трансформатором. Щоб одержати мінімальну похибку вимірювання, користуються кнопками "2,5", "5", "25", "50", "100" і тільки при  $K_p > 100$  кнопками "X10" і "X100". Необхідно також перевірити наявність генерації вимірюваного транзистора, для цього треба змінити в невеликих межах струм, що проходить через нього. При генерації спостерігається різка зміна  $K_p$ ;
- відрахувати коефіцієнт підсилення потужності транзистора. При відліку варто вибрати таку межу вимірювання, щоб стрілка приладу перебувала на другій половині шкали.

#### 5. Вимірювання коефіцієнта шуму:

- установити вертушку в положення " $F$ " з межею вимірювання 2,5... ..100;
- натиснути кнопку " $F_K$ " і відрахувати коефіцієнт шуму;
- вибрати межу вимірювання такою, щоб стрілка вимірювального приладу перебувала на другій половині шкали.

Схема включення функціонального елемента показана на рис.18.

#### Параметри досліджуваного транзистора:

1. Сила струму втрат затвору – не більше 1 мкА (при  $U_{зб} = -2,5$  В).
2. Крутість  $S$  - не менше 5 мА/В (при  $U_{сб} = 1,5$  В;  $I_c = 10$  мА),
3. Коефіцієнт шуму  $K_u > 2$  дБ (при  $I_c = 5$  мА;  $f = 8$  ГГц).

4. Коефіцієнт підсилення потужності  $K_{\text{ндс}}$  • не менше 1,5 (при  $I_c = 5 \text{ мА}$ ;  $f = 8 \text{ ГГц}$ ).

Зовнішній вигляд транзистора типу АП325А показаний на рис.19, безкорпусний ПТШ зображений на рис.20, його топологія – на рис.21, а вертикальна структура зображена на рис.22.

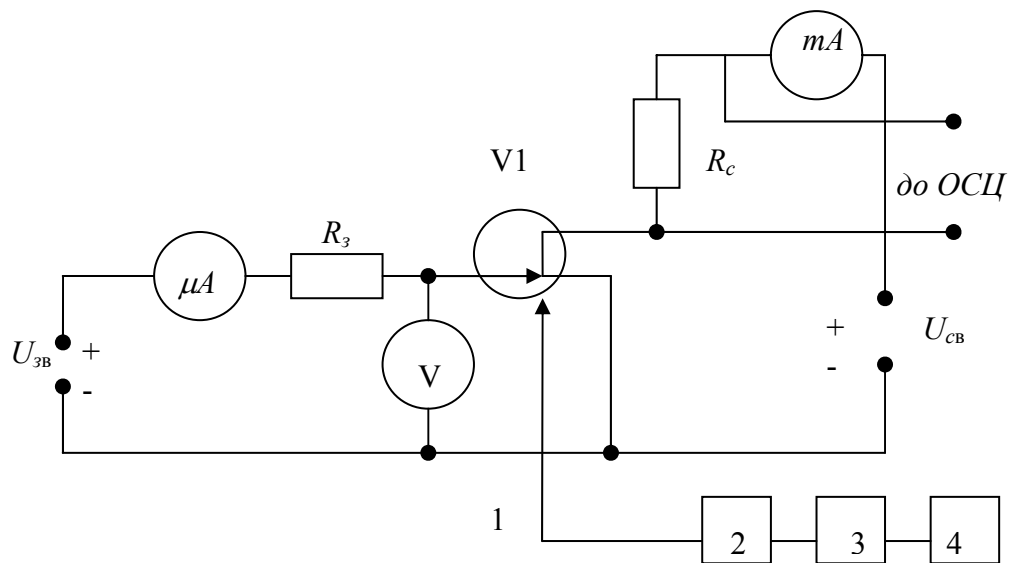


Рис.18. Схема лабораторної установки: 1 - ділянка світОВОДА; 2 - модулятор світла; 3 - гелій-неоновий лазер ЛГ-76; 4 - блок живлення лазера; V1 - польовий транзистор із затвором Шотткі типу АП325А

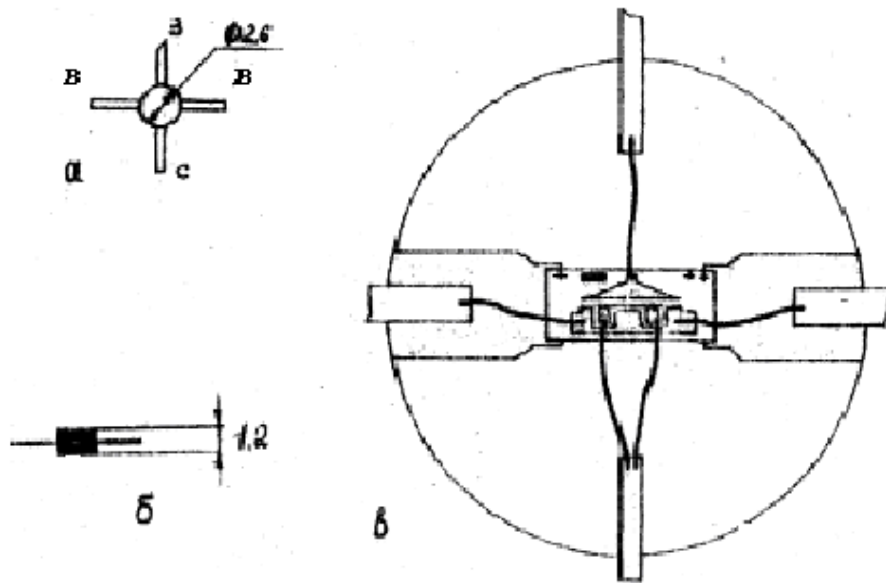


Рис.19. Зовнішній вигляд транзистора типу АП325А

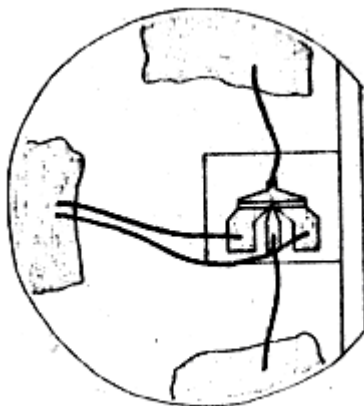


Рис.20. Безкорпусний ПТШ

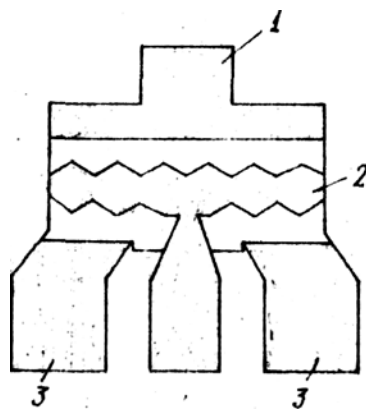


Рис.21. Топологія транзистора типу АП325А 1: 1- стік; 2 - затвор; 3 - виток

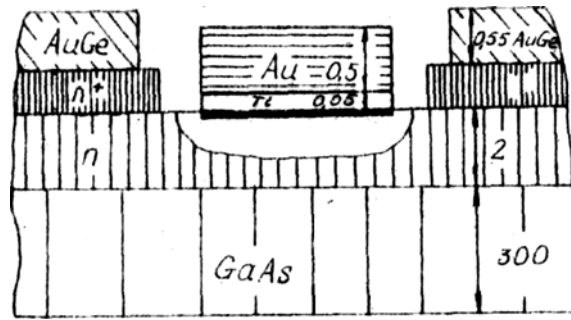


Рис.22. Вертикальна структура транзистора типу АП325А

### Порядок виконання роботи.

1. Зняти статичні характеристики ПТШ (без освітлення):

$$I_c(U_{зв})|_{U_{св}=const}; I_c(U_{св})|_{U_{зв}=const}.$$

- Визначити крутість

$$S(U_{св})|_{I_c=const}$$

- Зняти статичні характеристики при декількох значеннях освітленості (при постійному освітленні ПТШ лазерним випромінюванням).

- Побудувати залежності:

$$I_c(E)|_{U_{зв}=const}$$

$$S(E)|_{I_c=const}$$

2. Освітити транзистор імпульсним лазерним випромінюванням і спостерігати форму імпульсів струму у вихідному ланцюзі. Змінюючи  $U_{зв}$  і  $U_{св}$ , домогтися найбільшого посилення імпульсів на виході.
3. Виміряти коефіцієнт шуму й коефіцієнт підсилення функціонального елемента на установці Х 5-10.

## Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема лабораторної установки.
3. Основні параметри досліджуваного транзистора (теоретичні).
4. Експериментальні характеристики:
  - а) статичні ВАХ без освітлення;
  - б) статичні ВАХ при освітленні;
  - в) значення визначеної по ВАХ крутості;
  - г) значення коефіцієнтів підсилення й шуму,
5. Висновки по роботі.

## Контрольні запитання

1. Які бувають типи польових транзисторів залежно від способу ізоляції затвора від каналу ?
2. Який принцип роботи ПТШ ?
3. Чому для виготовлення НВЧ транзисторів доцільно використовувати *GaAs* ?
4. Які основні параметри ПТШ ?
5. Які основні функціональні можливості ПТШ ?
6. Які основні механізми генерації носіїв у структурі метал-напівпровідник ?
7. Що є причиною виникнення фотоЕРС ?
8. В чому полягає принцип внутрішнього посилення в ПТШ фотосигналу ?
9. Які основні області застосування ПТШ ?
10. Які основні параметри МШП НВЧ ?
11. Як вимірюється коефіцієнт шуму ?



## Список використаної та рекомендованої літератури

1. Андрушко, Л. М. Электронные и квантовые приборы СВЧ [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. М. Андрушко, Н. Д. Федоров ; под общ. ред. А. Д. Григорьева. – М. : Радио и связь, 1981. – 208 с. : ил. ; – Библиогр.: с. 202 – 203. – Предм. указ.: с. 204 – 205. – 25000 экз.
2. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. Росадо; под общ. ред. В. А. Терехова. – М. : Высшая школа, 1991. – 352 с. : ил. ; – Библиогр.: с. 339 – 340. – Предм. указ.: с. 341 – 345. – Перевод с испанского С. И. Баскакова. – 31800 экз. – ISBN 84-283-1528-0 (в пер.).
3. Антипов, Б. Л. Материалы электронной техники [Текст] : учеб. пособие для вузов / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов; под общ. ред. В. А. Терехова. – 2-е изд. – Санкт-Петербург. : Лань, 2001. – 208 с. : ил. ; – Библиогр.: с. 207.– 2000 экз. – ISBN 5-8114-0410-7.
4. Верещагин, И. К. Введение в оптоэлектронику [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Кокин. – М. : Высшая школа, 1991. – 192 с. : ил. ; – Библиогр.: с. 188 – 189. – 17500 экз. – ISBN 5-06-002064-9.
5. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов [Текст] : учеб. пособие для вузов / С. Зи. – М. : Энергия, 1973. – 656 с. : ил. ; - Библиогр.: с. 612 – 651. – Перевод с английского под. Ред. А. Ф. Трутко. – 13000 экз.