

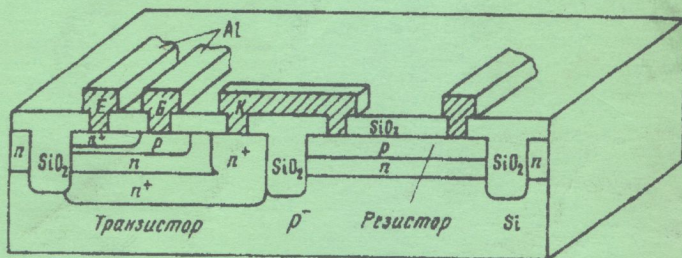
621.382(075)

075

С.І. Волинець, О.В. Грабчак, О.О. Лазарєв, М.А. Філінюк

# ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

## Задачі та питання



3280-4

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький державний технічний університет

С.І. Волинець, О.В. Грабчак, О.О. Лазарєв, М.А. Філінюк

# ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

## Задачі та питання



621.382(075) О 75 2002

Основи мікроелектроніки

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів електронноапаратобудівного профілю. Протокол №11 від 01.07.2001р.

Вінниця ВДТУ 2002



УДК 621.382(075)

В70

**Рецензенти:**

*Ю.В. Крушевський*, кандидат технічних наук, доцент

*В.К. Задорожний*, кандидат технічних наук, доцент

*А.О. Новіков*, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Волинець С.І., Грабчак О.В., Лазарєв О.О., Філінюк М.А.**

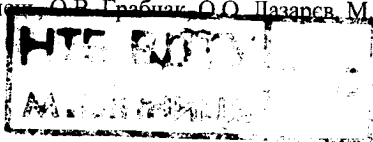
**В70 Основи мікроелектроніки. Задачі та питання.** Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2002. - 118 с.

У посібнику підібрані задачі та питання, які дозволяють визначити необхідні параметри матеріалів і елементів структур інтегральних схем, їх топологію та схемотехніку для досягнення заданої якості мікроселектронної апаратури..

Розраховано на студентів електронноапаратобудівного профілю. Може бути корисним студентам та фахівцям інших спеціальностей радіо та приладобудівного напрямків для поглиблення знань з напівпровідникової електроніки, використовуючи відповідні задачі.

УДК 621.382(075)

© С.І. Волинець, О.В. Грабчак, О.О. Лазарєв, М.А. Філінюк, 2002



# ЗМІСТ

<b>Список скорочень</b> .....	5
<b>Умовні позначки</b> .....	6
<b>Передмова</b> .....	8
<b>Тема 1. Рівноважні носії заряду в напівпровідниках</b> .....	11
1.1 Вправи для самоперевірки.....	11
1.2 Розв'язування .....	11
1.3. Задачі.....	14
<b>Тема 2. Нерівноважні носії заряду. Електропровідність</b> .....	21
2.1 Вправи для самоперевірки.....	21
2.2 Розв'язування .....	22
2.3 Задачі.....	25
<b>Тема 3. Оптичні явища і ефект Холла в напівпровідниках</b> .....	32
3.1 Вправи для самоперевірки.....	32
3.2 Розв'язування .....	33
3.3. Задачі.....	36
<b>Тема 4. Контактні та поверхневі явища в напівпровідниках</b> .....	44
4.1 Вправи для самоперевірки.....	44
4.2 Розв'язування .....	45
4.3 Задачі.....	48
<b>Тема 5. Біполярні транзистори інтегральних схем</b> .....	56
5.1 Вправи для самоперевірки.....	56
5.2 Розв'язування .....	58
5.3. Задачі.....	62
<b>Тема 6. Польові транзисторні структури ІС</b> .....	69
6.1 Вправи для самоперевірки.....	69
6.2 Розв'язування .....	71

6.3. Задачі.....	74
<b>Тема 7. Топологія, схемотехніка і технологія виробництва інтегральних схем.....</b>	<b>83</b>
7.1 Вправи для самоперевірки.....	83
7.2 Розв'язування.....	87
7.3. Задачі.....	93
<b>Відповіді.....</b>	<b>105</b>
<b>Література.....</b>	<b>117</b>

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ВІС – велика інтегральна схема

ЕРС – електрорушійна сила

ЗБ – загальна база

ЗЕ – загальний емітер

ІС – інтегральна схема

КМОН – комплементарний метал-оксид-напівпровідник

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник

МОН – метал-оксид-напівпровідник

ППЗ – прилад з зарядовим зв'язком

ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка

## УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

$\mu_n$  – рухливість електронів

$\mu_p$  – рухливість дірок

$m_n$  – ефективна маса електрона

$m_p$  – ефективна маса дірки

$m_0$  – маса вільного електрона

$e$  – заряд електрона

$N_c$  – плотність рівнів в зоні провідності

$N_v$  – плотність рівнів в валентній зоні

$n$  – концентрація електронів в зоні провідності

$p$  – концентрація дірок в валентній зоні

$n_i$  – власна концентрація носіїв заряду (електронів)

$n_0$  – рівноважна концентрація електронів

$p_0$  – рівноважна концентрація дірок

$N_a$  – концентрація акцепторних атомів

$N_d$  – концентрація донорних атомів

$N_0$  – число Авогадро

$W_F$  – рівень Фермі

$W_c$  – нижня границя зони провідності

$W_v$  – верхня границя валентної зони

$\Delta W$  – ширина забороненої зони

$k$  – постійна Больцмана

$T$  – температура

$\rho$  – питомий опір

$\gamma$  – питома провідність

$\gamma_i$  – власна питома провідність

$E$  – напруженість електричного поля

$j$  – густина струму

$D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів

$D_p$  – коефіцієнт дифузії дірок  
 $\tau_n$  – час життя електронів (неосновних носіїв в матеріалі р-типу)  
 $\tau_p$  – час життя дірок (неосновних носіїв в матеріалі n-типу)  
 $L_n$  – дифузійна довжина електронів (неосновних носіїв)  
 $L_p$  – дифузійна довжина дірок (неосновних носіїв)  
 $\lambda$  – довжина хвилі  
 $\eta$  – квантовий вихід внутрішнього фотоелектру  
 $h$  – постійна Планка  
 $R_H$  – коефіцієнт Холла  
 $r_H$  – множник Холла  
 $U_H$  – напруга Холла  
 $U_0$  – висота потенційного бар'єра р-n-переходу  
 $U_{np}$  – напруга лавинного пробою  
 $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність  
 $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму  
 $C_{бар}$  – бар'єрна ємність  
 $C_{диф}$  – дифузійна ємність  
 $A$  – площа поперечного перерізу р-n-переходу  
 $I_{нас}$  – зворотний струм насичення р-n-переходу  
 $U_T$  – температурний потенціал  
 $U_{zv}$  – зворотна напруга  
 $I$  – сила струму  
 $\beta$  – коефіцієнт передачі струму в схемі з ЗЕ  
 $\alpha$  – коефіцієнт передачі струму в схемі з ЗБ  
 $U_{пз}$  – напруга плоских зон  
 $U_F$  – потенціал Фермі  
 $Q_{ss}$  – поверхнева густина заряду  
 $x_{ок}$  – товщина оксидного шару  
 $S$  – крутизна стокзатворної характеристики польового транзистора



## Передмова

Мікроелектроніка - науково-технічний напрямок, що базується на досягненнях в галузях фізики твердого тіла, технології, мікросхемотехніки та схемотехніки. Знання основ мікроелектроніки необхідні конструктору-технологу електронних апаратів як для раціонального використання елементної бази при створенні радіоелектронної апаратури та приладів, так і для цілеспрямованого вибору технолого-топологічних і схемотехнічних шляхів мікромініатюризації та удосконалення параметрів елементної бази елементарних апаратів різного призначення.

Сучасні електронні апарати складаються з елементів, більшість з яких - монолітні (напівпровідникові) і гібридні (тонкоплівкові) інтегральні схеми (ІС). Маса-габаритні, експлуатаційні та економічні параметри електронних апаратів безпосередньо залежать від ступеня інтеграції і техніко-економічних показників елементної бази. Посуднення технологічних та схемотехнічних напрямків у проектуванні та виробництві великих інтегральних схем (ВІС) веде до різкого поліпшення якості електронних апаратів. Засвоєнню напрямків досягнення заданих параметрів інтегральних схем сприяє практичне вивчення технолого-конструкторського та схемотехнічного методів проектування елементів ВІС і властивостей матеріалів, з яких вони виготовлені.

Тому даний посібник має за мету дати студентам практичні навички у вирішенні різноманітних задач з досягнення заданих параметрів матеріалів і елементів структур ІС електронних апаратів.

Велику увагу приділено задачам, пов'язаним з практичним використанням матеріалів у мікроелектронній апаратурі методом досягнення заданих параметрів активних елементів ІС-транзисторів, МОН-структур з урахуванням технологічних і фізичних обмежень; аналізу взаємозв'язку між

електричними параметрами мікросхем і їх елементів з властивостями напівпровідникових структур і матеріалів.

Розв'язання задач сприяє більш глибокому засвоєнню лекційного матеріалу, прищеплює навички використання одержаних знань на практиці, розвиває мислення, допомагає детальніше зрозуміти принципи дії напівпровідникових приладів та інтегральних структур і можливості їх практичного використання. Деякі задачі мають оціночний характер, що, безумовно, важливо для розвитку у студентів уяви та ясності фізичного мислення. Важливу роль у розвитку творчих здібностей майбутніх інженерів в набутті ними практичних навиків відіграє самостійна робота студентів. Даний навчальний посібник призначений перш за все для самостійної роботи і містить більше 300 задач та запитань.

В посібнику здійснена спроба не просто дати набір задач, але і підібрати їх у певній послідовності, встановити внутрішні логічні зв'язки та охопити основне коло питань, що характеризують предмет.

Увесь посібник поділено на блоки, перший (теми 1, 2, 3) з яких звертає увагу на фізичні властивості напівпровідникових матеріалів, їх взаємодію з електромагнітним полем і пов'язані з цією взаємодією явища. Ця частина задач дає змогу кількісно і якісно оцінити напівпровідникові матеріали з точки зору їх використання для виробництва напівпровідникових приладів та елементів ІС. Задачі цього блоку вчать пов'язувати зміну електричних параметрів твердого тіла з особливостями його структури, насиченням домішками, зовнішнім фізичним впливом.

Другий блок (тема 4) задач дає змогу охонити різнобічно явища, які відбуваються при контакті напівпровідникових матеріалів різного типу провідності, напівпровідників та металів, а також поверхневі явища в напівпровідниках.

Фізичні властивості напівпровідникових транзисторних структур, їх взаємозалежність, визначення параметрів і характеристик транзисторів в

залежності від структур і зовнішніх впливів визначають тематику третього блоку (теми 5, 6).

На завершення, в останньому блоці (тема 7) подані задачі та питання, що стосуються топології інтегральних схем, технології їх виробництва, схемотехніки логічних елементів і елементів пам'яті ІС.

# ТЕМА1 РІВНОВАЖНІ НОСІЇ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

## 1.1 Вправи для самоперевірки

1.1.1 Зразок кремнію, що перебуває в стані термодинамічної рівноваги при температурі 300К, має такі параметри: питомий опір  $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; рухливість електронів  $\mu_n = 1600 \text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ; рухливість дірок  $\mu_p = 600 \text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ; власна концентрація носіїв  $n_i = 1,4\cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  і ефективна густина рівнів у зоні провідності  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Визначіть:

- концентрацію електронів і дірок;
- положення рівня Фермі;
- імовірність подій, коли донорний рівень зайнятий або вільний.

Відомо, що  $W_c - W_d = 50 \text{ меВ}$ .

1.1.2 Знайдіть положення рівнів Фермі в германії, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Матеріал легований акцепторними атомами з концентрацією  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Значення температури  $T=0, 100, 300$  і  $400\text{К}$ . Вважайте, що при  $T=100\text{К}$  іонізованими виявляються 50%, а при більш високих температурах іонізовано 100% домішкових атомів. При кімнатній температурі  $T_k$  має рівняння:

$$n_i^2 = 3,1 \cdot 10^{32} T_k^2 \exp(-9100/T_k).$$

1.1.3 Розрахувати концентрацію електронів і дірок в германії  $p$ -типу з питомим опором  $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при температурі 300К, якщо власна концентрація носіїв заряду  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , рухливість електронів  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ , рухливість дірок  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ .

## 1.2 Розв'язування

1.2.1 а). Запишемо рівняння, що визначають питому об'ємну провідність, а також рівняння напівпровідника (закон діючих мас);

$$\gamma = q(\mu_n n + \mu_p p); \quad n \cdot p = n_i^2.$$

Об'єднаючи ці дві формули, отримаємо  $\gamma = q(\mu_n n + \mu_p p)$ , тобто

$$0,2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \left[ 1600 \cdot n + \frac{600 \cdot (1,4 \cdot 10^{10})^2}{n} \right], \text{ звідки } n = 0,18 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Використовуючи рівняння напівпровідника, отримуємо  $p = 2,45 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ .

б). Відомо, що

$$n = N_c \exp\left(-\frac{W_c - W_F}{kT}\right).$$

Підставляючи відповідні значення, знаходимо

$$0,8 \cdot 10^{15} = 10^{19} \exp\left(-\frac{W_c - W_F}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 300}\right),$$

звідки  $W_c - W_F = 0,244 \text{ eV}$

в). Імовірність того, що донорний рівень заповнений,

$$f_{(w_d)} = \left[ 1 + \exp\left(\frac{W_d - W_F}{kT}\right) \right]^{-1}.$$

Тому, що  $W_c - W_F = 0,244 \text{ eV}$ , звідки  $W_c - W_d = 0,05 \text{ eV}$ ,

то  $W_d - W_F = 0,194 \text{ eV}$ , звідки

$$f_{(w_d)} = \left[ 1 + \exp\left(\frac{0,194}{0,026}\right) \right]^{-1} = 5,7 \cdot 10^{-4}.$$

Таким чином, імовірність того, що донорний рівень зайнятий, тобто відносна доля іонізованих атомів із зайнятим донорним рівнем, складає 0,057 %. В цей час відносна доля іонізованих атомів з незайнятим донорним рівнем дорівнює 99,943%.

Цікаво відмітити, що з ростом концентрації донорних атомів  $N_d$  рівень Фермі наближається до межі зони провідності. При цьому зростає ймовірність того, що він буде зайнятий, і зменшиться відносна доля іоні-

зованих донорних атомів. Аналогічні міркування використаємо у випадку акцепторної домішки. Якщо рівень  $W_F$  наближається до межі валентної зони, то кількість дірок зростає, а концентрація електронів зменшується.

1.2.2 При  $T=0$  К електропровідність відсутня і

$$W_F = W_i = \frac{W_c - W_V}{2}$$

При  $T=100$ К

$$n_i^2 = 3,1 \cdot 10^{32} (100)^3 \exp\left(-\frac{9100}{100}\right) \approx 0,093 \text{ см}^{-6} ;$$

$$n_i \approx 0,31 \text{ см}^{-3} ;$$

$$p = \frac{Na}{2} + \left[ \frac{Na^2}{4} + 300n_i^2 - 100n_i^2 \right]^{1,2} \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} ;$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} \approx 1,9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-3}$$

Таким чином, тут переважає режим домішкової електропровідності:

$$W_F = W_i - kT \ln \frac{5 \cdot 10^{14}}{0,31} = W_i - 0,0086 \ln \frac{5 \cdot 10^{14}}{0,31} = W_i - 0,302 \text{ еВ} .$$

При  $T=400$ К

$$n_i^2 = 2,63 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-6} \rightarrow n_i \approx 1,62 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} ;$$

$$p = \frac{Na}{2} + \left[ \frac{Na^2}{4} + 400n_i^2 - 300n_i^2 \right]^{1,2} \approx \frac{10^{15}}{2} + 1,6 \cdot 10^{15} \approx 2,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} .$$

Таким чином має місце режим власної електропровідності:

$$W_F = W_i + 0,034 \ln \frac{2,1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{15}} = W_i + 0,009 \text{ еВ} .$$

1.2.3 Питомий опір зв'язаний з концентрацією електронів і дірок рівнянням

$$\frac{1}{\rho} = en\mu_n + ep\mu_p = en_i^2 \mu_n / p + ep\mu_p .$$

Для концентрації дірок отримемо квадратне рівняння виду

$$p^2 - \frac{p}{e\mu_p\rho} + \frac{n_i^2\mu_n}{\mu_p} = 0.$$

Підставляючи вихідні дані, маємо

$$p^2 - \frac{p}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,19 \cdot 0,05} + \frac{(2,1 \cdot 10^{19}) \cdot 0,39}{0,19} = 0;$$

$$p^2 - 6,58 \cdot 10^{20} \cdot p + 9,03 \cdot 10^{38} = 0,$$

звідки  $p = 6,565 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

Другий розв'язок квадратного рівняння відкидаємо, тому що воно відповідає напівпровіднику *n*-типу. Концентрація неосновних носіїв заряду

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(2,1 \cdot 10^{19})^2}{(6,565 \cdot 10^{20})} = 6,72 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

### 1.3 Задачі

1.3.1 Визначити ймовірність заповнення електронами енергетичного рівня, розташованого на  $10kT$  вище рівня Фермі. Як зміниться ймовірність заповнення цього рівня електронами, якщо збільшити температуру в два рази?

1.3.2 Концентрація електронів провідності у напівпровіднику дорівнює  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Визначити концентрацію дірок у цьому напівпровіднику, якщо власна концентрація носіїв заряду при цій же температурі дорівнює  $10^{16} \text{ м}^{-3}$ .

1.3.3 Визначити положення рівня Фермі при  $T=300\text{К}$  у кристалах германію, що леговані миш'яком до концентрації  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ , а  $m_n = 0,55m_0$ .

1.3.4 У власному германії ширина забороненої зони при  $T = 300\text{К}$  дорівнює  $0,665 \text{ еВ}$ . На скільки треба підняти температуру, щоб кількість електронів в зоні провідності збільшити в два рази? Температурною змі-

ною ефективної густини станів електронів і дірок при розрахунках знехтувати.

1.3.5 Ширина забороненої зони германію при кімнатній температурі  $\Delta W=0,665$  еВ, а власна концентрація носіїв заряду  $n_i=2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . В скільки разів зміниться власна концентрація  $n_i$ , якщо температуру підняти до  $200^\circ\text{C}$ . Ефективні маси густини станів  $m_n=0,55m_0$ ,  $m_p=0,388m_0$ . Коефіцієнт зміни ширини забороненої зони від температури  $b=-3,9 \cdot 10^{-4}$  еВ/К.

1.3.6 Визначити власну концентрацію носіїв для кремнію при кімнатній температурі, якщо ефективні маси електронів і дірок відповідно дорівнюють  $m_n=1,1m_0$ ,  $m_p=0,56m_0$ , а ширина забороненої зони  $\Delta W=1,23$  еВ. Знайти положення рівня Фермі у власному германії при  $T=300\text{K}$ , якщо ширина його забороненої зони  $\Delta W=0,665$  еВ, а ефективні маси густини станів  $m_n=0,55 m_0$ ,  $m_p=0,388 m_0$ .

1.3.8 Визначити рівноважну концентрацію електронів і дірок в кремнії, якщо рівень Фермі при  $T=300\text{K}$  розташований на  $0,2$  еВ нижче дна зони провідності; для розрахунків прийняти:  $m_n=1,05 m_0$ ,  $m_p=0,56 m_0$ , а  $\Delta W=1,12$  еВ.

1.3.9 Визначити як зміниться концентрація дірок в германії, що легований донорами в концентрації  $N_d=10^{22} \text{ м}^{-3}$ , при його нагріванні від  $300$  до  $400\text{K}$ . Коефіцієнт температурної зміни ширини забороненої зони  $b=-3,9 \cdot 10^{-4}$  еВ/К, ширина забороненої зони  $\Delta W=0,665$  еВ; ефективні маси електронів і дірок  $m_n=0,388m_0$ ;  $m_p=0,55 m_0$  при  $T=300\text{K}$ .

1.3.10 Визначити власну концентрацію носіїв заряду в арсеніді галію при  $T=300\text{K}$  і  $500\text{K}$ , якщо ефективні маси густини станів  $m_n=0,067m_0$ ;  $m_p=0,48 m_0$ , а температурна зміна ширини забороненої зони відповідає виразу:

$$\Delta W(T) = 1,522 - 5,8 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 300).$$

1.3.11 Визначити положення рівня Фермі при  $T=300\text{K}$  в кристалах германію, що леговані  $2 \cdot 10^{22}$  атомами миш'яку і  $10^{22}$  атомами галію. ( $m_n=0,55 m_0$ ).



1.3.12 Визначити число атомів в одиниці об'єму кристала кремнію при  $T = 300\text{K}$ , якщо період кристалічної ґратки  $a = 0.54307\text{ nm}$ .

1.3.13 Кристал арсеніду індію легований сіркою так, що надмірна концентрація донорів  $N_d - N_a = 10^{22}\text{ m}^{-3}$ . Чи можна вважати, що при температурі  $T = 300^\circ\text{C}$  електричні параметри цього напівпровідника близькі параметрам власного арсеніду індію, якщо ефективні маси густини станів для електронів  $m_n = 0,023m_0$ , для дірок  $m_p = 0,43 m_0$ , а ширина забороненої зони  $InAs$  змінюється з температурою за законом  $\Delta W(T) = 0,462 - 3,5 \cdot 10^{-4} T$ .

1.3.14 Визначити ймовірність знаходження електронів на рівнях  $W_F + 0,1\text{ eV}$  і  $W_F - 0,1\text{ eV}$  при температурах 0, 150, 300 і 1000K.

1.3.15 Яка відносна похибка при заміні розподілу Фермі-Дірака розподілом Максвелла-Больцмана при  $W - W_F = kT$  і при  $W - W_F = 4kT$ ?

1.3.16 Який зсув рівня  $W_i$  відносно центра забороненої зони для германію при  $T = 300\text{K}$ , при  $m_n = 1,1m_0$ ,  $m_p = 0,56m_0$ ?

1.3.17 Визначити положення рівня Фермі при температурі  $T = 300\text{K}$  арсеніду галію, який легований телуром до  $N_{\text{Te}} = 10^{23}\text{ m}^{-3}$ . Ефективна маса густини станів  $m_n = 0,067m_0$ . Температурна зміна ширини забороненої зони визначається, як  $\Delta W(T) = 1,522 - 5,8 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 300)$ .

1.3.18 В скільки разів відрізняються рівноважні концентрації дірок при кімнатній температурі в кристалах кремнію і арсеніду галію, які мають однакову концентрацію донорної домішки  $N_d = 10^{21}\text{ m}^{-3}$   $\Delta W_{\text{Si}} = 1,21\text{ eV}$ .  $\Delta W_{\text{GaAs}} = 1,43\text{ eV}$ ; Si:  $m_n = 1,05m_0$ ;  $m_p = 0,56m_0$ ; GaAs:  $m_n = 0,067m_0$ ,  $m_p = 0,48m_0$ .

1.3.19 Рівень Фермі в германію при  $T = 300\text{K}$  розташований на 0,1 eV вище стелі валентної зони. Розрахувати рівноважні концентрації електронів і дірок в цьому матеріалі, якщо ефективні маси густини станів для дірок валентної зони і для електронів зони провідності відповідно дорівнюють:  $m_p = 0,388m_0$ ;  $m_n = 0,55m_0$ , а ширина забороненої зони  $\Delta W = 0,665\text{ eV}$ .

1.3.20 Рівень Фермі у напівпровідника міститься на 0,3 еВ нижче дна зони провідності. Яка ймовірність того, що при кімнатній температурі енергетичні рівні, які розташовані на  $4kT$  вище дна зони провідності, зайняті електронами? Яка ймовірність того, що на рівні стелі валентної зони містяться дірки, якщо ширина забороненої зони напівпровідника 1,1 еВ?

1.3.21 Рівень Фермі у напівпровідника міститься на 0,01 еВ вище стелі валентної зони. Розрахувати: а) ймовірність появи дірки на верхньому рівні валентної зони при 300 і 50К; б) ймовірність знаходження електрона на дні зони провідності при 300К, коли ширина забороненої зони напівпровідника  $\Delta W=0,67$  еВ.

1.3.22 У кристалах арсеніду галію на кожні  $10^6$  атомів галію припадає один атом цинку. Припускаючи, що ефективна маса густини станів для дірок валентної зони  $m_p=0,48m_0$ , знайти положення рівня Фермі при  $T=300$ К.

1.3.23 В епітаксіальних шарах арсеніду галію надмірна концентрація донорів  $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Визначити положення рівня Фермі та концентрацію неосновних носіїв заряду при  $T=300$ К, якщо  $m_p=0,48m_0$ ;  $m_n=0,067m_0$ , а температурна зміна ширини забороненої зони підлягає виразу:

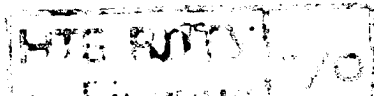
$$\Delta W(T) = 1,522 - 5,8 \cdot 10^{-4} T^2 / (T+300).$$

1.3.24 Зразок кремнію знаходиться при  $T=300$ К. Знайти питомий опір власного напівпровідника  $n_i = 6,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ;  $\mu_n = 1200 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 250 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.25 Визначити питомий опір напівпровідника  $n$ -типу, якщо концентрація донорних атомів  $N_d = 3,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $\mu_n = 1200 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$

1.3.26 У зразку кремнію електрон масою  $m$  має теплову енергію порядку  $kT$ , яка зв'язана із середньою швидкістю теплового руху співвідношенням

$\bar{v} = \left( \frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$ . Якщо відомо, що при кімнатній температурі  $\mu_n = 1350 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , покажіть, що швидкість дрейфу електронів мала в по-



рівнянні з швидкістю теплового руху при напруженості зовнішнього поля  $E_1 = 10 \text{ В/см}$ , а при  $E_2 = 1000 \text{ В/см}$  – велика.

1.3.27 Оцінити теплову і дрейфову швидкості електронів при  $T = 300\text{К}$  у германії  $n$ -типу з концентрацією донорів  $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , якщо густина струму крізь зразок  $j = 10^4 \text{ А/м}^2$ , а ефективна маса електронів провідності  $m_n = 0,12m_0$ .

1.3.28 Визначити відношення повного струму через напівпровідник до струму, обумовленому дірковою складовою у власному германії, коли  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.29 Визначити відношення повного струму через напівпровідник  $p$ -типу з питомим опором  $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , до струму, обумовленого дірковою складовою, якщо  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}\cdot\text{с}$ .

1.3.30 Визначити власну питому провідність германію при кімнатній температурі, коли  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.31 Визначити час, за який електрон пройде через стержень довжиною  $50 \text{ мм}$  при дії напруги  $50\text{В}$ , коли рухливість електронів у матеріалі стержня ( $\text{GaAs}$ )  $\mu_n = 0,9 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.32 Питомий опір власного кремнію при  $T = 300\text{К}$  дорівнює  $2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , власна концентрація носіїв  $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ . Визначити при цій температурі питомий опір кремнію  $n$ -типу з концентрацією електронів  $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , коли рухливість електронів в три рази більша рухливості дірок, як для власного, так і для домішкового напівпровідника.

1.3.33 Визначити питомий опір германію  $p$ -типу з концентрацією дірок  $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , коли  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.34 Визначити відношення електронної провідності до діркової у германії  $p$ -типу з концентрацією дірок  $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , коли  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.35 Зразок кремнію  $n$ -типу при  $T_1 = 300\text{К}$  має питомий опір  $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , і концентрація електронів у нього незмінна до  $T_2 = 500\text{К}$ . При температурі  $T_1$ :  $\mu_n = 0,4 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $n_i = 7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ ;  $\Delta W = 1,12 \text{ еВ}$ ; при темпера-

турі  $T_2$ :  $N_c = 5,79 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ;  $N_v = 2,26 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Коефіцієнт температурної зміни ширини забороненої зони  $b = 2,84 \cdot 10^{-1} \text{ еВ/К}$ . Визначити на скільки змінюється концентрація неосновних носіїв заряду в цьому температурному діапазоні.

1.3.36 При температурі  $T = 300\text{К}$  концентрація дірок у германії  $p$ -типу дорівнює  $2,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , а концентрація електронів в сто разів менша. Знайти власний питомий опір германію, коли  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

1.3.37 Визначіть концентрацію акцепторних атомів  $N_a$ , яка необхідна для досягнення максимального питомого опору, коли  $\mu_p/\mu_n = 2,18$ ;  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

1.3.38 Епітаксіальний шар арсеніду галію, легованого сіркою, має при кімнатній температурі питомий опір  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Визначити концентрацію донорів у шарі, якщо рухливість електронів  $\mu_n = 0,8 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

1.3.39 Питомий опір антимоніду галію при  $T = 300\text{К}$  дорівнює  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Визначити власну концентрацію носіїв заряду цього напівпровідника, якщо  $\mu_n = 0,4 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,14 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.40 Через пластину кремнію з питомим опором  $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  проходить електричний струм густиною  $10 \text{ мА/мм}^2$ . Знайти швидкості дрейфу електронів і дірок, якщо їх рухливості  $0,14$  і  $0,05 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  відповідно.

1.3.41 Визначити концентрацію електронів і дірок в германії  $p$ -типу з питомим опором  $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  при температурі  $300\text{К}$ , коли  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

1.3.42 Визначити концентрацію носіїв, при якій питома провідність германію при  $T = 300\text{К}$  має найменше значення. Прийняти  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

1.3.43 Визначити відношення власної питомої провідності германію до мінімальної, якщо  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ; при  $T = 300\text{К}$ .

1.3.44 Оцінити середню довжину вільного пробігу електронів у арсеніду галію при  $T = 300\text{K}$ , якщо їх ефективна маса  $m_n = 0,07m$ , а рухливість  $\mu_n = 0,85 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

1.3.45 Пластина з германію  $n$ -типу має питомий опір  $\rho = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  і ширину  $d = 10^{-2}$ . До пластини прикладена різниця потенціалів  $U = 1\text{В}$ . Визначити:

- а) густину струму;
- б) час, за який носій заряду перетне пластину;
- в) відношення густин струмів дірок і електронів.

Покладіть, що  $\mu_n = 3900 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p = 1900 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $n_i = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

1.3.46 Через кристал кремнію  $n$ -типу з питомим опором  $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  пропускають електричний струм густиною  $200 \text{ mA}/\text{см}^2$ . За який час електрони проходять відстань  $10 \text{ мкм}$ , якщо їх рухливість  $0,14 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ?

## ТЕМА 2 НЕРІВНОВАЖНІ НОСІЇ ЗАРЯДУ. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ

### 2.1 Вправи для самоперевірки

2.1.1 У зразку кремнію  $n$ -типу при температурі  $T = 300\text{K}$  час життя неосновних носіїв заряду  $\tau_p = 5$  мкс, їх рухливість  $\mu_p = 0,04 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . В одну з площин зразка вводиться і підтримується постійною в часі надмірна концентрація дірок  $\Delta p_0 = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Визначити густину дифузійного струму в безпосередній близькості від цієї площини. На якій глибині концентрація дірок складе  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ ? Вважати, що товщина зразка значно більша дифузійної довжини носіїв заряду.

2.1.2 Визначити, при якій концентрації домішок питома провідність германію при  $T = 300\text{K}$  має найменше значення. Знайти відношення власної питомої провідності до мінімальної при цій температурі. Власна концентрація носіїв заряду при кімнатній температурі  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , рухливість електронів  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , рухливість дірок  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.1.3 Процес інжекції носіїв приводить до розділу квазірівнів Фермі, що відносяться до електронів і дірок. Покажіть, що при порушенні термодинамічної рівноваги добуток концентрацій носіїв буде таким же, що й у рівноважному стані, якщо замість ширини забороненої зони  $\Delta W$  використовувати параметр  $\Delta W - (W_{Fn} - W_{Fp})$ .

2.1.4 Напівпровідник легований акцепторною домішкою до концентрації  $N_a = 2n_i$ . Визначити, в скільки разів зміниться питома провідність напівпровідника по відношенню до власної, якщо відношення рухливостей електронів і дірок  $\mu_n/\mu_p = b$ . Вважати, що всі акцептори знаходяться в іонізованому стані.

2.1.5 Кристали арсеніду галію  $n$ -типу мають питомий опір  $\rho = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , рухливість електронів  $\mu_n = 0,2 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$  і в якості основної легуєної домішки містять кремній у кількості  $10^{-2}$  ат.%. Вважаючи, що всі

атоми кремнію електрично активні, визначити, скільки їх є у вузлах галію і скільки у вузлах миш'яку. Густина матеріалу  $d = 5320 \text{ кг/м}^3$ .

## 2.2 Розв'язування

2.2.1 На основі співвідношення Ейнштейна визначимо коефіцієнт дифузії дірок:  $D_p = \mu_p kT/e = 0,04 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 / 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ . Дифузійна довжина неосновних носіїв заряду

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} = \sqrt{1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 7,19 \cdot 10^{-5} \text{ м} \approx 72 \text{ мкм}.$$

Розподіл дірок по товщині зразка при одновимірній дифузії характеризується рівнянням  $\Delta p = \Delta p_0 \exp(-x/L_p)$ , де  $x$  - відстань від поверхні. Густина дифузійного струму при одновимірній дифузії

$$j_p = -e D_p \frac{dp}{dx} = \frac{e D_p}{L_p} \Delta p(x).$$

Для  $x = 0$  (тобто безпосередньо біля поверхні)

$$j_p = \frac{e D_p}{L_p} \Delta p_0 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{19}}{7,2 \cdot 10^{-5}} = 23 \text{ А/м}^2.$$

Глибина  $x_l$ , на якій досягається задана концентрація неосновних носіїв заряду:

$$x_l = -L_p \ln \frac{\Delta p_l}{\Delta p_0} = -72 \ln \frac{10^{18}}{10^{19}} = 166 \text{ мкм}.$$

2.2.2 Мінімум питомої провідності знаходимо з умови  $d\gamma/dn = 0$ .

Враховуючи, що  $\gamma = e n \mu_n + e p \mu_p = e n \mu_n + \frac{e n_i^2}{n} \mu_p$ , після диференціювання отримаємо:

$$e \mu_n - e n_i^2 \mu_p / n_i^2 = 0.$$

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо:

$$n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}; \quad p = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}.$$

Для германію при 300К отримуємо:

$$n = 2,1 \cdot 10^{19} \sqrt{0,19/0,39} = 1,47 \cdot 10^{19} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$p = 2,1 \cdot 10^{19} \sqrt{0,39/0,19} = 3,01 \cdot 10^{19} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Таким чином, мінімальну питому провідність має слабологований напівпровідник  $p$ -типу.

Враховуючи, що власна питома провідність визначається рівнянням  $\gamma_i = en_i(\mu_n + \mu_p)$ , знаходимо відношення:

$$\frac{\gamma_i}{\gamma_{\min}} = \frac{\mu_n + \mu_p}{2\sqrt{\mu_n\mu_p}} = \frac{0,39 + 0,19}{2\sqrt{0,39 \cdot 0,19}} = 1,065.$$

### 2.2.3 В стані термодинамічної рівноваги

$$n \cdot p = N_c \cdot N_v \exp[-\Delta W'/(kT)],$$

де  $\Delta W' = \Delta W - (W_{Fn} - W_{Fp})$  у відповідності з приведеними умовами.

Якщо термодинамічна рівновага порушується, то

$$n = n_i \exp\left(-\frac{W_{Fn} - W_i}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{W_c - W_{Fn}}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{W_i - W_{Fp}}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{W_{Fp} - W_p}{kT}\right)$$

і тому

$$np = N_c \cdot N_v \exp\left[-\frac{\Delta W - (W_{Fn} - W_{Fp})}{kT}\right],$$

де  $\Delta W = W_c - W_v$ .

Отже, доказано, що добуток концентрацій носіїв виходить однако-вим незалежно від того, чи виконуються умови термодинамічної рівноваги, якщо вважати, що ширина заборонної зони  $\Delta W' = \Delta W - (W_{Fn} - W_{Fp})$ .

2.2.4 У відповідності до співвідношення “діючих мас” для носіїв заряду маємо:  $n \cdot p = n_i^2$ . З умови електронейтральності кристалу виходить, що  $p = n + N_a$ . Звідси для концентрації основних носіїв заряду отримаємо рівняння  $p^2 - 2n_i p - n_i^2 = 0$ . Його розв’язок:  $p = (1 + \sqrt{2})n_i$ . Другий корінь відкидаємо, виходячи з фізичного змісту.



Концентрація неосновних носіїв заряду  $n = \frac{n_i}{1 + \sqrt{2}}$ . Питома провід-

ність легованого напівпровідника

$$\gamma = en\mu_n + ep\mu_p = en_i\mu_p(0,414 \cdot b + 2,414).$$

Власа питома провідність напівпровідника при тій же температурі

$$\gamma_i = en_i(\mu_n + \mu_p) = en_i\mu_p(b + 1).$$

Звідси визначаємо відношення питомих провідностей:

$$\gamma / \gamma_i = (0,414b + 2,414) / (b + 1).$$

2.2.5 В склад елементарної комірки типу сфалериту входить чотири формульні одиниці  $GaAs$ . Тому густина  $d$  зв'язана з періодом кубічної ґратки співвідношенням

$$d = 4M_{GaAs} / (N_o a^3),$$

$$\text{де } M_{GaAs} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot M}{N_o d}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 144,64}{6,02 \cdot 10^{26} \cdot 5320}} = 0,565 \text{ нм.}$$

$N_o$ - число Авогадро.

В одиниці об'єму міститься

$$N_{Ga} + N_{As} = \frac{8}{a^3} = \frac{8}{(0,565)^3} = 4,42 \cdot 10^{28} \text{ атомів.}$$

Звідси загальна концентрація атомів кремнію в ґратці  $GaAs$ :

$$N_{Si} = 4,42 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-4} = 4,42 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрація електронів визначається різницею концентрацій донорів і акцепторів:

$$n = N_d - N_a = (e\rho\mu_n)^{-1} = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2)^{-1} = 1,56 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Кремній є амфотерною домішкою в  $GaAs$  і проявляє акцепторні властивості при входженні у вузли миш'яку та донорні – при заміщенні атомів галію. Тому:

$$N_{Si}(Ga) - N_{Si}(As) = 1,56 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

З приведених формул виходить, що

$$N_{Si}(Ga) = 3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}; N_{Si}(As) = 1,42 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

## 2.3 Задачі

2.3.1 Визначити коефіцієнт дифузії дірок у невідродженому напівпровіднику при кімнатній температурі, якщо їх рухливість  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.2 Визначити рухливість носіїв у невідродженому германії при кімнатній температурі, якщо коефіцієнт дифузії  $D_n = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

2.3.3 Визначити дифузійну довжину дірок у невідродженому кремнії при кімнатній температурі, якщо час життя дірок  $\tau_p = 400 \text{ нс}$ , а їх рухливість  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.4 Визначити час життя електронів у невідродженому германії при  $T = 300 \text{ К}$ , якщо дифузійна довжина електронів  $L_n = 1,5 \text{ мм}$ , а коефіцієнт дифузії  $D_n = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

2.3.5 На скільки зміниться коефіцієнт дифузії електронів у невідродженому напівпровіднику при підвищенні температури на 10%, якщо рухливість електронів змінюється пропорційно  $T^{-3/2}$ ?

2.3.6 При легуванні напівпровідника донорами час життя неосновних носіїв заряду зменшився в п'ять раз, а їх рухливість знизилась на 30%. Визначити, на скільки змінилась дифузійна довжина дірок при легуванні напівпровідника в порівнянні з нелегованим матеріалом.

2.3.7 Визначити дифузійну довжину дірок у германії  $n$ -типу, якщо час життя неосновних носіїв заряду  $\tau_p = 10^{-7} \text{ с}$ , а коефіцієнт дифузії  $D_p = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

2.3.8 Дифузійна довжина у кристалів  $\text{Si}$ ,  $\text{GaAs}$  і  $\text{Ge}$  дорівнює  $1 \text{ мм}$ . Визначити час життя електронів в цих матеріалах при кімнатній температурі, коли рухливості електронів відповідно дорівнюють  $0,14 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $0,95 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.9 У зразку кремнію  $n$ -типу при  $T = 300 \text{ К}$  час життя неосновних носіїв заряду  $\tau_p = 5 \text{ нс}$ , а їх рухливість  $\mu_p = 0,04 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Визначити дифузійну довжину неосновних носіїв.

2.3.10 Визначити час життя неосновних носіїв заряду в напівпровіднику, якщо їх стала концентрація при дії джерела збудження складає  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ , а початкова швидкість зменшення надмірної концентрації при вимкненні джерела  $7,1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}/\text{с}$ .

2.3.11 Знайти надмірну концентрацію неосновних носіїв заряду в напівпровіднику через  $t = 2$  мс після вимкнення джерела збудження, якщо стала концентрація їх при збудженні  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ , а початкова швидкість зменшення при вимкненні джерела  $7,1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.12 За час  $t_2 = t_D^{-4} \text{ с}$ , після припинення генерації електронно-діркових пар, яка рівномірна по об'єму напівпровідника, надмірна концентрація носіїв заряду стала в десять раз більша, ніж в момент  $t_2 = 10^{-3} \text{ с}$ . Визначити час життя нерівноважних носіїв, вважаючи його постійним і незалежним від інтенсивності збудження.

2.3.13 Визначити дифузійну довжину електронів у кремнії  $p$ -типу, якщо їх надмірна концентрація при віддаленні від поверхні на 2 мм зменшується в 20 разів?

2.3.14 При освітленні зразка германію при  $T=300\text{K}$  іонізуються атоми домішки до концентрації  $N_d=10^{17} \text{ см}^{-3}$ , та генерується  $10^{18}$  електронно-діркових пар в секунду. Визначить надмірну концентрацію носіїв, а також відносну зміну концентрації носіїв внаслідок дії фотонів, якщо  $\tau_n = \tau_p = 2 \text{ нс}$ .

2.3.15 Освітлення зразка германію при  $T=300\text{K}$  іонізує атоми домішки, створюючи концентрацію домішки  $N_d=10^{17} \text{ см}^{-3}$  і обумовлює постійну генерацію  $10^{18}$  електронно-діркових пар в секунду. В момент  $t_0$  дія потоку фотонів щезає. За який час надмірна концентрація знизиться до 5% початкового значення?  $\tau_n = \tau_p = 2 \text{ нс}$ .

2.3.16 У зразку арсеніду-галію, що легований донорами до  $N_d=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , в результаті зовнішнього збудження в кожну секунду, в  $1 \text{ см}^3$  генерується  $10^{20}$  електронно-діркових пар. Вважаючи низький рівень інжекції, визначити коефіцієнт рекомбінації, якщо  $\tau_n = \tau_p = 50 \text{ нс}$ .

2.3.17 При зовнішньому збудженні у зразку арсеніду-галію, що легований донорною домішкою до концентрації  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , в  $1 \text{ см}^3$  генерується  $10^{20}$  електронно-діркових пар. Вважаючи рівень інжекції низьким, визначити надмірну концентрацію в стаціонарному режимі.

2.3.18 У однорідний напівпровідник  $n$ -типу в площині  $x = 0$  безперервно інжектуються дірки так, що  $\Delta p(0) = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Визначити надмірну концентрацію дірок на відстані  $x = 2 \text{ мм}$  від поверхні, якщо  $\tau_p = 10^{-4} \text{ с}$ ;  $D_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

2.3.19 Визначити положення квазірівнів Фермі у напівпровіднику, що легований акцепторною домішкою з  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при кімнатній температурі, коли  $G = 10^{18} \text{ см}^3/\text{с}$ ;  $\tau_n = 10 \text{ мкс}$ ;  $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

2.3.20 У зразку кремнію  $p$ -типу, який знаходиться при кімнатній температурі, розподіл акцепторів по осі  $x$  описується функцією  $N_a(x) = N \exp(-x / X_0)$ , де  $X_0 = 0,5 \text{ мкм}$ . Визначити густину струмів дрейфу і дифузії для дірок в залежності від величини  $N_a$ . Припустити, що  $D_p = 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu_n = 40 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.21 У зразку кремнію  $p$ -типу при  $T = 300 \text{ К}$  розподіл концентрації акцепторів вздовж осі  $x$  описується функцією  $N_a(x) = N \exp(-x / X_0)$ , де  $X_0 = 0,5 \text{ мкм}$ . Вважаючи, що  $p(x) = N_a(x)$ , розрахуйте напруженість внутрішнього електричного поля, коли  $D_p = 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

2.3.22 Існує однорідна пластина кремнію  $n$ -типу з концентрацією  $N_d = 2,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при температурі  $T = 300 \text{ К}$ . Спочатку пластина перебуває в рівноважному стані, потім освітлюється потоком монохроматичного світла, після чого знову повертається в рівноважний стан. Вчислити: а) рівноважні концентрації  $n_0$  і  $p_0$ ; б) нерівноважні концентрації  $n_n$  і  $p_n$  для таких значень концентрації інжектованих надмірних носіїв:  $\Delta n_n = \Delta p_n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; 2)  $\Delta n_n = \Delta p_n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Вказати, який рівень інжекції (низький, або високий) буде реалізований в кожному випадку. Відомо, що  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ;  $\Delta n_n = n_n - n_0$ ,  $\Delta p_n = p_n - p_0$ . Вказівка: низький рівень інжекції характеризують нерівністю  $np - n_i^2 \ll M^2$ , де  $M$  - надмірна концентрація основних носіїв,  $n$

і  $p$  повна концентрація носіїв. Нерівність  $np - n_i^2 \gg M^2$  характеризує високий рівень інжекції.

2.3.23 Швидкість рекомбінації дірок у напівпровіднику  $n$ -типу  $v_p = 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , а надмірна концентрація  $\Delta p_n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Знайти середній час життя неосновних носіїв.

2.3.24 Визначити концентрацію акцепторів  $N_a$ , яка необхідна для досягнення максимального питомого опору кремнію, якщо  $\mu_n/\mu_p = 2,18$ ;  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

2.3.25 На скільки збільшиться питома провідність антимоніду індію з власною електропровідністю при зміні температури з 20 до 21°C, якщо ширина забороненої зони  $\Delta W = 0,17 \text{ eV}$ , а рухливість електронів і дірок змінюється за законом  $T^{-3,2}$ . Коефіцієнт температурної зміни ширини забороненої зони  $b = -2,8 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ .

2.3.26 Антимонід індію з  $N_a = 5n_i$  має відношення рухливості електронів до рухливості дірок  $\mu_n/\mu_p = 50$ . Визначити, в скільки раз зміниться питома провідність напівпровідника по відношенню до власної.

2.3.27 Питомий опір антимоніду індію з концентрацією дірок  $p = 10^{23} \text{ м}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ K}$  складає  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Визначити рухливість електронів і дірок, якщо їх відношення  $\mu_n/\mu_p = 40$ , а власна концентрація носіїв заряду  $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ .

2.3.28 Визначити питомий опір чистого германію з періодом ідентичності ґратки  $a = 0,35667 \text{ нм}$ . При температурі  $T = 300 \text{ K}$  іонізований один з кожних  $2 \cdot 10^{19}$  атомів. Рухливості електронів і дірок відповідно 0,39 і  $0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.29 Визначити відношення власної питомої провідності до мінімальної при  $T = 300 \text{ K}$  для антимоніду індію з параметрами,  $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_p = 0,075 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu_n = 7,8 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.30 У власному германії при  $T = 300 \text{ K}$  концентрація атомів  $4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , а концентрація електронів провідності  $n = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Чому дорівнює концентрація дірок при цій температурі у домішковому германії,

який має один атом донорних домішок на  $10^{16}$  атомів основної речовини?

2.3.31 Визначити струм через зразок кремнію прямокутної форми розмірами  $l \cdot b \cdot h = 5 \cdot 2 \cdot 1$  мм, якщо вздовж нього прикладена напруга 10В. Відомо, що концентрація електронів у напівпровіднику  $n = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , їх рухливість  $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.32 Зразок германію складається з  $10^{20} \text{ м}^{-3}$  донорних атомів і  $7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  акцепторних домішкових атомів. При даній температурі питомий опір германію рівний 0,5 Ом·м. Визначити рівноважні концентрації електронів і дірок, а також густину дрейфового струму, який проходитьиме по зразку під дією електричного поля напруженістю 200 В/м. Рухливість електронів  $\mu_n = 0,39$  і дірок  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

2.3.33 Обчислити власний питомий опір арсеніду галію при температурах 300 і 500К, якщо температурні зміни рухливості електронів і дірок визначаються виразами:  $\mu_n = 0,85 (T/300)^{-2}$ ;  $\mu_p = 0,045 (T/300)^{-2,5}$

2.3.34 Обчислити при температурі 300К питомий опір кристалу германію, в якому на кожні  $10^7$  атомів кристалічної ґратки приходиться один атом сурми. Відомо, що період кристалічної ґратки  $a = 0,5657$  нм, а рухливість електронів  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

2.3.35 Визначити для температури  $T = 40\text{К}$  концентрацію дірок і питомий опір кремнію  $p$ -типу, легованого бором до концентрації  $N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , якщо ефективна маса густини станів  $m_p = 0,56 m_0$ , положення енергетичного рівня бору  $W_p + 0,045$  еВ, а рухливість дірок змінюється за температурою, за законом  $\mu_p = 0,045 \cdot (T/300)^{-3,2}$ .

2.3.36 Кристали кремнію мають концентрацію електронів  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ , а їх рухливість  $0,14 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ . Визначити, в скільки раз питомий опір цих кристалів менший власного питомого опору кремнію при  $T = 300\text{К}$ , якщо  $n_i = 7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ , а  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

2.3.37 Визначити: а) яка концентрація атомів акцепторних домішок потрібна для отримання арсеніду галію з питомою провідністю 10 мсм/см при кімнатній температурі; б) яке при цьому відношення атомів акцептор-

ної домішки до числа атомів галію; в) яка питома провідність арсеніду галію, якщо він складається з такої ж концентрації атомів донорних домішок. Рухливість дірок і електронів відповідно дорівнює 0,045 і 0,8 м<sup>2</sup>/(В·с).

2.3.38 Зразок кремнію має у якості домішок фосфор з концентрацією атомів 2·10<sup>20</sup>м<sup>-3</sup>. Яку потрібно створити концентрацію атомів галію в цьому напівпровіднику, щоб тип електропровідності змінився на протилежний, а питомий опір становив 0,5 Ом·м? Відомо, що рухливість дірок  $\mu_p = 0,05$  м<sup>2</sup>/(В·с). Виразити потрібну концентрацію галію в масових долях, якщо густина кремнію  $d = 2,328$  мг/м<sup>3</sup>.

2.3.39 В результаті вимірювань встановлено, що кристали арсеніду галію, леговані телуrom, при кімнатній температурі мають питомий опір  $\rho = 10^{-3}$  Ом·м, рухливість електронів  $\mu_n = 0,5$  м<sup>2</sup>/(В·с) і мають у своєму складі залізо, як залишкові домішки в масовій долі 10<sup>-5</sup> %. Обчислити, який питомий опір мали б кристали при відсутності домішок заліза. Зміною рухливості електронів знехтувати. Густина арсеніду галію 5,32 Мг/м<sup>3</sup>.

2.3.40 Визначити питомий опір кристалів арсеніду галію легованих хромом до концентрації 2·10<sup>21</sup>м<sup>-3</sup> при температурі  $T = 300$ К, якщо енергія іонізації атомів хрому  $\Delta W_a = 790$  меВ, рухливість дірок  $\mu_p = 0,04$  м<sup>2</sup>/В·с, а їх ефективна маса 0,48 $m_0$ .

2.3.41 Пластина германію *n*-типу має питомий опір  $\rho = 0,1$  Ом·см і товщину  $d = 10^{-2}$  см. До пластини прикладена різниця потенціалів  $U = 1$ В. Визначити відношення густин струмів дірок і електронів, при  $\mu_n = 3900$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $\mu_p = 1900$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $n_i = 2,4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

2.3.42 Через кристал кремнію *n*-типу з питомим опором 0,1 Ом·м пропускають електричний струм густиною 200 мА/см<sup>2</sup>. За який час електрони проходять відстань 10 мкм, якщо їх рухливість 0,14 м<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>?

2.3.43 Визначити мінімальну атомну долю домішок  $N_{\text{дом}}$  в антимоніді індію, нижче якої власна електропровідність домінує у напівпровіднику навіть при кімнатній температурі. Вихідні дані:  $d = 5780$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_n = 7,8$  м<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $\mu_p = 0,075$  м<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $n_i = 2 \cdot 10^{22}$  м<sup>-3</sup>.

2.3.44 Питомий опір антимоніду індію  $n$ -типу  $\rho = 3 \cdot 10^{-5}$  Ом·м. рухливість електронів  $\mu_n = 7,8 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , основна легуюча домішка – олово в кількості  $10^{-3}$  ат.%. Вважаючи, що всі атоми домішки іонізовані, визначити скільки їх міститься у вузлах індію і у вузлах сурми, якщо густина матеріалу  $\text{InSb}$   $d = 5780 \text{ кг/м}^3$ .

2.3.45 Визначити при якій концентрації домішок питома провідність арсеніду галію при температурі 300К має найменше значення, якщо  $n_i = 1,72 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ;  $\mu_n = 0,95 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;  $\mu_p = 0,045 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

2.3.46 Порівняти відносну зміну питомих провідностей міді і власного германію при підвищенні температури від 20 до 21°C.  $\alpha_p = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ;  $\rho_{(20^\circ\text{C})} = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ;  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;

$$\Delta W = 0,66 \text{ eВ} \frac{d(\Delta W)}{dT} \cdot 10 = 3,9 \frac{\text{eВ}}{\text{К}}$$



## ТЕМА 3 ОПТИЧНІ ЯВИЩА І ЕФЕКТ ХОЛЛА В НАПІВПРОВІДНИКАХ

### 3.1 Вправи для самоперевірки

3.1.1 На пластину з арсеніду галію площею  $S = 100 \text{ мм}^2$  і товщиною  $b = 0,5 \text{ мм}$  падає монохроматичне випромінювання довжиною хвилі  $\lambda = 556 \text{ нм}$ . Визначити число електронно-діркових пар, що генеруються кожену секунду в об'ємі напівпровідника при освітленості  $E = 100 \text{ Лк}$ . Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту взяти рівним одиниці. Процесами відбиття світла знехтувати. На заданій довжині хвилі показник поглинання матеріалу  $\alpha = 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

3.1.2 Пластина германію  $n$ -типу довжиною  $l = 10 \text{ мм}$ , шириною  $a = 2 \text{ мм}$  і товщиною  $b = 0,5 \text{ мм}$ , має поздовжній опір  $R = 2 \text{ кОм}$ . Час життя неосновних носіїв заряду  $\tau_p = 100 \text{ мкс}$ . На зразок поверхні нормально падає монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 0,546 \text{ мкм}$ . На цій довжині хвилі світловий еквівалент потоку випромінювання  $K_\lambda = 625 \text{ лм/Вт}$ . Вважаючи, що весь падаючий на зразок світловий потік повністю витрачається на генерацію електронно-діркових пар, визначити, при якій освітленості зразка його опір зменшиться в два рази. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту  $\eta = 1$ , а рухливість електронів  $\mu_n = 0,39$  і  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . При даній температурі власна концентрація носіїв  $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Поверхневою рекомбінацією знехтувати.

3.1.3 На пластину напівпровідника розмірами  $l \times b \times d$  перпендикулярно плоскій поверхні падає потік монохроматичного випромінювання інтенсивністю  $I_0$ . Показник заломлення напівпровідника  $n_0$  і показник оптичного поглинання  $\alpha$ . Вважаючи, що в створенні фотоструму  $I_\phi$  беруть участь тільки електрони і, нехтуючи темновим струмом, довести, що

$$I_\phi = e \mu_n \tau_n \eta \frac{b}{l} I_0 \frac{4 n_0 U}{(n_0 + 1)^2} (1 - e^{-\alpha d}),$$

де  $\tau_n$  - час життя електронів;  $\eta$  - квантовий вихід внутрішнього фотоефекту;  $d$  - розмір напівпровідникової пластини (в напрямку падання світла);  $U$  - напруга прикладена вздовж пластини (за розміром  $l$ ).

3.1.4 В експерименті з вивчення ефекту Холла, який проведений із зразком кремнію розмірами  $l \times a \times d = 1,0 \times 0,2 \times 0,1$ , де  $l$  - довжина,  $a$  - ширина,  $d$  - товщина зразка, отримані такі дані: при напрузі  $U = 0,245$  В тече струм вздовж зразка  $I = 5$  мА; нормально поверхні ( $l \times a$ ) діє магнітне поле індукцією  $B = 1$  Тл; виміряна напруга Холла  $U_H = 2,0$  мВ. Вважаючи, що множник Холла  $r_H = 1,18$ , визначить: а) тип напівпровідника; б) концентрацію основних носіїв; в) холлівську рухливість носіїв; г) рухливість, що пов'язана з протіканням основного струму; д) коефіцієнт дифузії.

## 3.2 Розв'язування

3.2.1 На заданій довжині хвилі показник поглинання  $GaAs$  великий, глибина поглинання  $\frac{1}{\alpha} \ll b$ . Тому всі фотони падаючого випромінювання поглинаються в об'ємі напівпровідника, кожен з яких відповідний за виникнення нової пари носіїв заряду. На пластину падає світловий потік  $\Phi = E \cdot S = 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 10^{-2}$  Лм. На довжині хвилі  $\lambda = 0,0556$  мкм потужність випромінювання 1 Вт відповідає світловому потоку 683 Лм. Потужність випромінювання, що падає на пластину напівпровідника,  $P = (683)^{-1} \cdot 10^{-2} = 1,46 \cdot 10^{-5}$  Вт. Довжині хвилі  $\lambda = 0,556$  мкм відповідає енергія фотонів  $h\nu = hc/\lambda = 2,23$  еВ. Звідки визначасмо кількість фотонів, що поглинаються в об'ємі напівпровідника в одиницю часу. Вона дорівнює числу генерованих електронно-діркових пар

$$N_{\phi} = \frac{P}{h\nu} = \frac{1,46 \cdot 10^{-5}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,23} = 4,1 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}.$$

3.2.2 Знайдемо питомий опір германію  $\rho_H = R_H \cdot a \cdot b / l = 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} / 10^{-2} = 0,2$  Ом·м. Питомий опір пов'язаний з концентрацією

носіїв заряду співвідношенням:

$$\frac{1}{\rho_0} = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) = e(n_0\mu_n + n_i^2\mu_p / n_0).$$

Звідси отримуємо рівняння для рівноважної концентрації електронів:

$$n_0^2 - \frac{n_0}{e\mu_n\rho_0} + \frac{n_i^2\mu_p}{\mu_n} = 0. \text{ Підставивши в нього значення з умови задачі, має-}$$

$$\text{мо} \quad n_0^2 - \frac{n_0}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,39 \cdot 0,2} + \frac{(2,1 \cdot 10^{19})^2 \cdot 0,19}{0,39} = 0 \quad \text{або}$$

$$n_0^2 - 8 \cdot 10^{19} n_0 + 2,15 \cdot 10^{38} = 0.$$

Розв'язком цього рівняння є  $n_0 = 7,72 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Рівноважна концентрація дірок  $p_0 = n_i^2/n_0 = (2,1 \cdot 10^{19})^2 / 7,72 \cdot 10^{19} = 5,7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . При поглинанні світла в зразку генерується однакова кількість нерівноважних електронів  $\Delta n$  і дірок  $\Delta p$ . Тому питома провідність освітленого зразка:

$$\gamma_c = e(\Delta n + n_0)\mu_n + e(\Delta p + p_0)\mu_p = \frac{2}{\rho_0} = 10 \text{ см/М або}$$

$10 = 1,6 \cdot 10^{19} \Delta n(0,39 + 0,19) + 1/0,2$ . Звідки  $\Delta n = \Delta p = 5,4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Загальна кількість нерівноважних носіїв, що створюються при поглинанні фотонів у всьому об'ємі зразка  $V$ :

$$\Delta n_{\Sigma} = \Delta p_{\Sigma} = \Delta n \cdot V = 5,4 \cdot 10^{19} (10 \cdot 2 \cdot 0,5) 10^{-9} = 5,4 \cdot 10^{11}.$$

Внаслідок рекомбінації число електронно-діркових пар в зразку зменшується зі швидкістю:

$$r = \Delta n_{\Sigma} / \tau = 5,4 \cdot 10^{11} / 10^{-4} = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Щоб у зразку підтримувалась необхідна динамічна рівновага, тобто незмінна кількість нерівноважних носіїв заряду, необхідне виконання умови  $r = \eta N_{\phi}$ , де  $N_{\phi}$  - число фотонів, що кожену секунду поглинається в об'ємі напівпровідника. Необхідний світловий потік:

$$\Phi = N_{\phi} \frac{hc}{\lambda} K_{\lambda} = \frac{5,4 \cdot 10^{15} \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 625}{0,546 \cdot 10^{-6}} = 1,23 \text{ лм}.$$

Тоді освітленість зразка  $F = \Phi/S = 1,23/(10 \cdot 10^{-6}) = 6,15 \cdot 10^4$  лк.

3.2.3 У відповідності до закону Бугера-Ламберта зміна інтенсивності випромінювання при віддаленні від поверхні в глибину напівпровідника  $I(x) = I_0(1-R) \exp(-\alpha x)$ . При нормальному падінні світлових променів коефіцієнт френелівського відбиття  $R = (n_0 - 1)^2 / (n_0 + 1)^2$ . Виділимо тонкий шар товщиною  $dx$ , в межах якого інтенсивність випромінювання можна вважати постійною. Тоді в стаціонарних умовах для надмірної концентрації електронів справедливий вираз  $\Delta n(x) = g(x) \tau_n = \eta \alpha \tau_n I_0 (1-R) \exp(-\alpha x)$ , де  $g(x) = dl/dx$  – швидкість оптичної генерації носіїв заряду. Електричний струм, що протікає в шарі  $dx$  на глибині  $x$ ,  $dI_{\phi} = \gamma(x) E \cdot v dx = e v \Delta n(x) \mu_n U / l dx$ . Підсумовуючи провідність усіх шарів, і перейшовши до інтегралу, знайдемо повний фотострум:

$$I_{\phi} = e \mu_n b \frac{U}{l} \int_0^d \Delta n(x) dx = e \mu_n \tau_n \eta U \frac{b}{l} I_0 \frac{4n_0}{(n_0 + 1)^2} (1 - e^{-\alpha d}).$$

3.2.4 а) Тому, що напруга  $U_n$  позитивна, зразок виконаний з напівпровідника  $p$ -типу.

$$\text{б) } j = \frac{I}{(ad)}; \quad E_n = \frac{U_n}{a}; \quad E = \frac{U}{l};$$

$$R_n = \frac{r_n}{e \cdot p} = \frac{E_n}{j \cdot B} = \frac{U_n \cdot d}{I \cdot B} = \frac{U_n}{ajB};$$

$$p = r_n I \cdot B / (e U_n d) = 1,84 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$\text{в) } \mu_{p(\text{Холла})} = \frac{r_n \cdot \gamma}{e \cdot p} = \gamma |R_n| = \frac{U_n \cdot l}{aUB} = 408 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

$$\mu_{p(\text{електропровідність})} = 408/1,18 = 346 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

$$\text{г) } \frac{\mu_{p(\text{Холла})}}{\mu_{p(\text{електропровідність})}} = r_n.$$

д)

$$D_p = \left( \frac{kT}{e} \right) \mu_p = 9 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

### 3.3 Задачі

3.3.1 Визначіть енергію фотонів для червоного випромінювання ( $\lambda=700$  нм). Вкажіть, які напівпровідники прозорі для цього випромінювання, а які його поглинають.

3.3.2 Визначити мінімальну довжину світлової хвилі, для якої арсенід галію, що має ширину забороненої зони 1,43 еВ при температурі 300К, оптично прозорий. Як буде змінюватися ця гранична довжина хвилі при зниженні температури?

3.3.3 Визначіть порогову довжину хвилі власного поглинання арсеніду галію при температурі кипіння рідинного азоту (7,2К), коли ширина його забороненої зони при  $T=300\text{К}$  дорівнює 1,13еВ, а  $\frac{d(\Delta W)}{dT} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ еВ/К}$ .

3.3.4 При температурі 300К для монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі 1 мкм показник поглинання кремнію  $\alpha = 10^4 \text{ м}^{-1}$ , а коефіцієнт відбиття випромінювання  $R=0,3$ . Визначити долю потоку випромінювання  $\Phi(h)$ , що пройде через пластину кремнію товщиною  $h = 300$  мкм при нормальному падінні.

3.3.5 Визначити надмірну концентрацію носіїв заряду в епітаксiаль-ному шарі кремнію товщиною  $b = 20$  мкм при оптичному збудженні монохроматичним випромінюванням з інтенсивністю  $I = 10^{21} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ , якщо час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau = 10$  нс, а показник власного поглинання кремнію на довжині хвилі випромінювання  $\alpha = 2000 \text{ м}^{-1}$ . Квантовий вихід внутрішнього фотоелектру  $\eta$  прийняти рівним одиниці.

3.3.6 При тих же умовах, що і в задачі 3.3.5, знайти відносну зміну питомої провідності кремнію під дією оптичного збудження, якщо пито-

мий опір матеріалу в темноті  $\rho_T = 0,2$  Ом·м, а рухливість електронів і дірок 0,14 і  $0,05 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  відповідно.

3.3.7 Визначити відношення питомих провідностей плівки сульфід кадмію  $n$ -типу товщиною 100 мкм в темноті і при однорідному оптичному збудженні  $\gamma$  монохроматичним випроміненням інтенсивністю  $I_0(I-R) = 10^{20} \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ , якщо рівноважна концентрація електронів у зразку  $n_0 = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , показник поглинання  $\alpha = 10^2 \text{ м}^{-1}$ , а час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau_n = 10$  нс. Складовою діркової провідності у загальній фотопровідності можна знехтувати. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту покласти рівним одиниці.

3.3.8 Визначити фотострум  $I_\phi$  через фоторезистор сульфід кадмію площею  $10 \times 1$  мм і товщиною 1 мкм при впливі на нього монохроматичного випромінення з  $\lambda = 0,5$  мкм і густиною потоку  $10 \text{ Вт/м}^2$ , який падає нормально поверхні напівпровідника. Електрична напруга, яка прикладена вздовж фоточутливої плівки, складає 5В. В даному спектральному діапазоні коефіцієнт поглинання  $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$ , показник заломлення  $n_0 = 2,26$ . Рухливість електронів  $\mu_n = 0,03 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , час їх життя  $\tau_n = 10^{-3}$  с. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту покласти рівним одиниці. Темновим струмом знехтувати. Як зміниться фотострум, якщо на фоточутливу плівку з CdS впливати монохроматичним випроміненням ( $\lambda = 1$  мкм)?

3.3.9 В якому з напівпровідникових матеріалів власна фотопровідність спостерігається при найбільшій довжині хвилі падаючого на напівпровідник випромінення: *Ge, Si, SiC, InSb, GaAs, GaP, CdS*?

3.3.10 Довгохвильовій границі зовнішнього фотоефекту сурм'яноцезієвого фотокатоду при температурі близькій до абсолютного нуля відповідає довжина хвилі  $\lambda_1 = 0,65$  мкм, а поріг фотопровідності в цьому матеріалі спостерігається при  $\lambda_2 = 2,07$  мкм. Визначити положення дна зони провідності даного напівпровідника відносно енергетичного рівня вакууму.

3.3.11 Довгохвильовій границі фотопровідності власного напівпро-

відника відповідає  $\lambda=1,86$  мкм. Визначити температурний коефіцієнт питомого опору матеріалу для  $T = 300\text{K}$ .

3.3.12 Зобразить (якісно) на одному графіку спектральні характеристики власної фотопровідності для кремнію і германію Пояснити відмінність в положенні цих кривих.

3.3.13 На рис. 3.1 показані спектральні характеристики оптичного пропускання  $\tau_0$  двох прозорих електродів різної товщини на основі діоксиду олова з однаковою питомою провідністю. Визначити для діоксиду олова показник поглинання  $\alpha$  випромінювання зеленого кольору, використовуючи верхню криву, яка отримана для електрода товщиною 2 мкм. Яка товщина другого електрода?

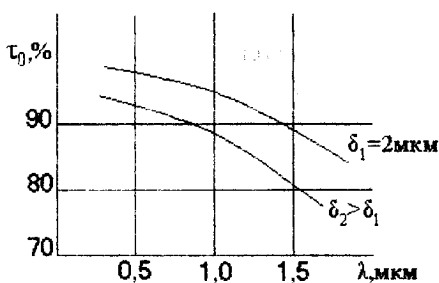


Рисунок 3.1

3.3.14 Яка повинна бути ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу, щоб довжина хвилі рекомбінаційного випромінювання припадала на видиму область спектра?

3.3.15 Визначити відношення числа носіїв заряду, які проходять за одиницю часу через електроди фоточутливого напівпровідника, до числа фотонів, які поглинаються напівпровідником за такий же термін, якщо відомо, що при повному поглинанні монохроматичного випромінювання ( $\lambda=565$  нм) потужністю 100 мкВт фотострум дорівнює 10мА. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту покласти рівним одиниці.

3.3.16 Визначити максимальну ширину забороненої зони, яку може

мати напівпровідник, що використовується як фотодетектор, якщо він повинен бути чутливим до випромінення з довжиною хвилі  $\lambda=565$  нм.

3.3.17 На напівпровідниковий фотодетектор площею  $0,5 \text{ мм}^2$  падає потік монохроматичного випромінення ( $\lambda=0,565 \text{ мкм}$ ) густиною  $20 \text{ мкВт/м}^2$ . Визначити кількість електронно-діркових пар, які щосекундно генеруються в об'ємі напівпровідника, вважаючи, що кожний фотон створює лиш одну пару носіїв заряду.

3.3.18 Використовуючи розв'язок задачі 3.3.17, визначити в скільки разів зміниться швидкість генерації, якщо густина потоку випромінення зменшиться в два рази.

3.3.19 Використовуючи розв'язок задачі 3.3.17, визначити як зміниться швидкість оптичної генерації, якщо довжина хвилі  $\lambda$  зменшиться вдвоє.

3.3.20 На рис.3.2 показаний спектр власного поглинання антимоніду індію для двох різних температур. На основі цих даних оцінити ширину забороненої зони напівпровідника при вказаних температурах.

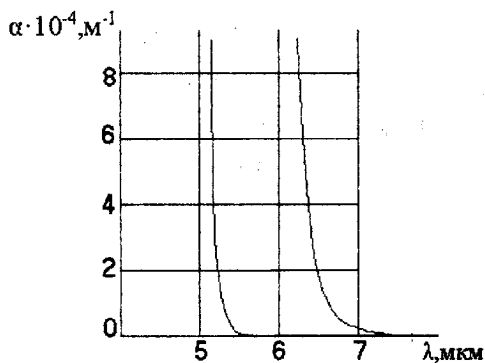


Рисунок 3.2

3.3.21 Визначити фотострум, що протікає через фоторезистор з довжиною чутливого елемента  $l=5 \text{ мм}$ . Коли до його електродів прикладена напруга  $U=10\text{В}$  при однорідному оптичному збудженні  $I_0(1-R)=10^{20} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ . Час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau=10 \text{ нс}$ , показник поглинання



матеріалу фоторезистора на довжині хвилі випромінення  $\alpha = 30000 \text{ м}^{-1}$ , а рухливості електронів і дірок  $\mu_n=0,034$  і  $\mu_p=0,011 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  відповідно. Вважати квантовий вихід внутрішнього фотоефекту рівним одиниці.

3.3.22 Фоторезистор чутливістю  $\frac{I_\phi}{I_0} = 10^{-4} \text{ Ам}^2\text{с}^{-1}$  при напрузі

$U=10\text{В}$  опромінюється монохроматичним випроміненням довжиною хвилі  $\lambda=700 \text{ нм}$ . Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту  $\eta = 0,9$ , коефіцієнт відбиття випромінення  $R=0,3$ , час життя носіїв заряду в матеріалі фоторезистора  $\tau=10\text{мс}$ , а рухливість електронів і дірок  $\mu_n=0,95 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p=0,045 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Визначити необхідну довжину фоточутливого елемента фоторезистора.

3.3.23 Час дрейфу носія заряду через резистор при напрузі  $U=10\text{В}$  дорівнює  $t_{np}=5\text{мкс}$ . Визначити рухливість носіїв заряду матеріалу чутливого шару фоторезистора, якщо його довжина  $l=7\text{мм}$ .

3.3.24 Прямокутний зразок напівпровідника  $n$ -типу з розмірами  $a=50\text{мм}$ ,  $b=5\text{мм}$  і  $d=1\text{мм}$  занурений у магнітне поле з індукцією  $B = 0,5\text{Тл}$ . Вектор магнітної індукції перпендикулярний площі  $a \times b$  зразка. Під дією напруги  $U_a=0,42\text{В}$ , прикладеної вздовж зразка, по ньому протікає струм  $I_a=20\text{мА}$ . Вимірювання показують ЕРС Холла  $U_H=6,25 \text{ мВ}$ . Знайти питому провідність напівпровідника і коефіцієнт Холла.

3.3.25 Використовуючи дані задачі 3.3.24, визначити концентрацію носіїв заряду, вважаючи, що електропровідність обумовлена носіями тільки одного знака.

3.3.26 Використовуючи розв'язок задач 3.3.24 і 3.3.25, визначити рухливість носіїв заряду.

3.3.27 При тих же умовах, що і в задачі 3.3.24, визначити ЕРС Холла в зразку міді тих же розмірів, по якому протікає той же струм. Концентрацію електронів провідності міді вважати рівною  $8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

3.3.28 Плоский прямокутний зразок фосфіду індію з питомим опором  $\rho=2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  і рухливістю електронів  $\mu_n=0,4 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  занурений у маг-

нітне поле індукцією  $B=1$  Тл, вектор якої перпендикулярний площині кристалу. Вздовж зразка протікає струм  $I=20$  мА. Визначити силу Лоренца, яка діє на електрони, якщо площа поперечного перерізу зразка  $S=2$  мм<sup>2</sup>.

3.3.29 Зразок арсеніду галію з питомим опором  $5 \cdot 10^{-4}$  Ом·м характеризується коефіцієнтом Холла  $R_H=3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Кл. Визначити: а) напруженість холлівського поля, яка виникає при пропусканні через зразок струму густиною  $j=10$  мА/мм<sup>2</sup> і дії магнітного поля з індукцією  $B=2$  Тл. б) напруженість зовнішнього електричного поля для створення заданої густини струму.

3.3.30 Кристал кремнію легований бором до концентрації  $N_a=10^{22}$  м<sup>-3</sup>. Визначити коефіцієнт Холла для температур 40 і 400 К, якщо енергія іонізації бору в кремнії  $\Delta W_a=45$  меВ, а ефективна маса густини станів для дірок валентної зони  $m_p=0,56m_0$ .

3.3.31 Визначити рухливість і концентрацію електронів в кремнії  $n$ -типу, питомий опір якого  $\rho=1,8 \cdot 10^{-2}$  Ом·м, а коефіцієнт Холла  $R_H=2,1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/Кл.

3.3.32 У кремнії  $n$ -типу з концентрацією донорів  $N_d=2 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup> при температурі  $T_1=20$  К коефіцієнт Холла  $R_{H1}=428$  м<sup>3</sup>/Кл, а при температурі  $T_2=40$  К  $R_{H2}=0,21$  м<sup>3</sup>/Кл. Визначити енергію іонізації донорів.

3.3.33 Плівка антимоніду індію  $n$ -типу розмірами  $l \times b=20 \times 10$  мм розташована в площині, що перпендикулярна магнітному полю Землі. Визначити, яку різницю потенціалів необхідно прикласти вздовж плівки, щоб на інших боках отримати ЕРС Холла  $U_H=1$  мВ. Вважати індукцію магнітного поля Землі рівною 44 мкТл, а рухливість електронів  $\mu_n=7,8$  м<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>.

3.3.34 Визначити тип електропровідності напівпровідника, якщо ЕРС Холла має полярність, яка вказана на рис. 3.3.

3.3.35 Яке буде значення ЕРС Холла, якщо ширину напівпровідникової пластини (рис. 3.3) зменшити в два рази при: а) незмінних напруженостях електричного і магнітного полів; б) незмінних індукції магнітного поля і густини струму через зразок; в) незмінній індукції магнітного поля і

струму через зразок?

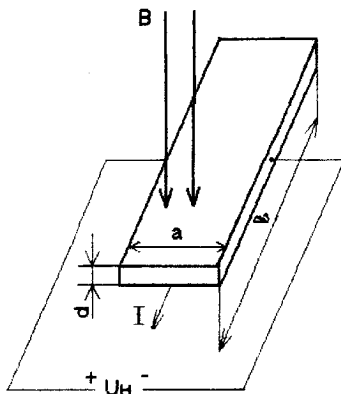


Рисунок 3.3

3.3.36 Визначити коефіцієнт Холла для германію з власною електропровідністю при температурах  $T_1=300\text{К}$  і  $T_2=500\text{К}$ , вважаючи, що рухливості електронів і дірок змінюються у відповідності з виразами:  $\mu_n=0,39(T/300)^{-3/2}$ ;  $\mu_p=0,19(T/300)^{-3/2}$ . Власна концентрація носіїв заряду при кімнатній температурі  $n_i=2,1 \cdot 10^{19}\text{м}^{-3}$ , коефіцієнт температурної зміни ширини забороненої зони  $\epsilon=-3,9 \cdot 10^{-4}\text{еВ/К}$ , а ефективні маси густини станів для електронів і дірок дорівнюють:  $m_n=0,55m_0$ ;  $m_p=0,388m_0$ , де  $m_0$  – маса вільного електрона.

3.3.37 Вздовж зразка германію з поперечним перерізом  $0,1 \times 0,2\text{ см}$  і концентрацією легуючих домішок  $10^{17}\text{см}^{-3}$  протікає струм  $0,6\text{А}$ . Перпендикулярно напрямку струму діє магнітне поле з індукцією  $0,5\text{Тл}$ . Визначити напругу Холла між контактами вузьких сторін бічної поверхні зразка.

3.3.38 Визначити ЕРС Холла, яка виникає в пластині германію товщиною  $0,5\text{ мм}$  з власною електропровідністю при температурі  $300\text{К}$ , якщо вздовж пластини проходить струм  $I=10\text{мА}$ . Вектор магнітної індукції перпендикулярний площині пластини  $B=0,6\text{Тл}$ . Концентрація власних носіїв

заряду при даній температурі  $n_i=2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , а відношення рухливостей електронів і дірок  $\mu_n/\mu_p=2,05$ .

3.3.39 Установлено, що при деякій температурі в кристалі чистого антимоніду індію ЕРС Холла дорівнює нулю. Визначити, яка доля електричного струму через зразок при цій температурі переноситься дірками, якщо відношення рухливості електронів до рухливості дірок  $\mu_n/\mu_p=100$ .

3.3.40 Розв'язати попередню задачу для германію, враховуючи, що  $\mu_n=0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p=0,19 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

3.3.41 Визначити, при якому співвідношенні концентрацій електронів і дірок в кремнії ЕРС Холла дорівнює нулю, якщо їх рухливості дорівнюють відповідно  $0,14$  і  $0,05 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

3.3.42 В результаті вимірювань установлено, що в пластині кремнію *p*-типу при температурі  $T=500 \text{ К}$  спостерігається інверсія знака коефіцієнта Холла. Знайти концентрацію акцепторів у напівпровіднику, якщо  $\mu_n=0,14 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p=0,048 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , причому відношення рухливостей незмінне у всьому інтервалі вимірювань. Власна концентрація носіїв заряду в кремнії при  $T=500 \text{ К}$   $n_i=1,8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

3.3.43 У приладі для дослідження ефекту Холла в зразку германію, рис. 3.3, при  $l=2,5 \text{ мм}$ ;  $d=50 \text{ мкм}$ ;  $a=0,25 \text{ мм}$ ;  $I=2 \text{ мА}$ ;  $B=5 \cdot 10^{-1} \text{ Тл}$  отримано  $U=85 \text{ мВ}$  (в напрямку струму  $I$ );  $U_H=-1,25 \text{ мВ}$ . Визначити концентрацію носіїв заряду.

3.3.44 За умовою задачі 3.3.43 визначити коефіцієнт Холла.

3.3.45 За умовою задачі 3.3.43 визначити рухливість основних носіїв заряду.

3.3.46 Довести, що при заданих напруженостях електричного і магнітного полів ЕРС Холла прямо пропорційна рухливості носіїв заряду.

## ТЕМА 4 КОНТАКТНІ ТА ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА В НАПІВПРОВІДНИКАХ

### 4.1 Вправи для самоперевірки

4.1.1 Існує виготовлений з кремнію  $p$ - $n$ -перехід, який знаходиться при температурі 300К;  $p$ -область переходу легована атомами бору (елемент третьої групи, періодичної системи елементів) з концентрацією  $10^{21}\text{м}^{-3}$ . Область  $n$  переходу легована атомами фосфору (елемент п'ятої групи) з концентрацією  $10^{20}\text{м}^{-3}$ . Вчисліть: а) висоту потенціального бар'єра  $U_0$ , якщо  $U=0$ ;  $n_i=1,5 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ ; б) координати меж з'єднаної області з кожного боку переходу, якщо прикладена напруга  $U = -10\text{В}$ . Параметр  $\varepsilon \cdot \varepsilon_0 = 1,062 \cdot 10^{-12}\text{Ф} \cdot \text{см}^{-1}$ ; в) бар'єрну ємність при тій же напрузі  $-10\text{В}$ , якщо площа поперечного перерізу переходу  $A=10^{-8}\text{м}^2$ ; г) напругу лавинного пробоя  $U_{np}$ . Вважайте, що таке явище настає при напруженості електричного поля  $E=1,5 \cdot 10^7\text{В/м}$ .

4.1.2 Різкий  $p$ - $n$ -перехід, виготовлений з кремнію, перебуває при температурі 300К. Спочатку напруга зміщення відсутня. Потім до переходу прикладають таке негативне зміщення, що струм через діод стає рівним 1мА. Концентрація легуючих домішок по боках переходу складає  $10^{21}\text{м}^{-3}$ . Площа поперечного перерізу переходу  $10^{-6}\text{м}^2$ . Розрахувати час, за який напруга зміщення зростає до  $-10\text{В}$ . Задано:  $n_i=1,5 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ ;  $\varepsilon \cdot \varepsilon_0 = 1,062 \cdot 10^{-12}\text{Ф/см}$ .

4.1.3 Відомо, що при  $T=300\text{К}$  кремнієвий діод  $p$ - $n^+$ -типу, тобто з підвищеним рівнем легування  $n$ -області, має такі параметри:  $W_p=100\text{мкм}$ ;  $D_n=20\text{см}^2\text{с}^{-1}$ ;  $\tau_n=0,2\text{мкс}$ ;  $A=10^{-3}\text{см}^2$ . Розрахувати: а) надмірну концентрацію електронів у  $p$ -області як функцію відстані від площини переходу, вважаючи, що струм  $I=1,2\text{мА}$ ; б) електричний заряд, який накопичиться в нейтральній  $p$ -області; в) номінали основних елементів еквівалентної схеми діода для малого сигналу при заданому струмі  $I$ , тобто диференціального

(динамічного) опору і дифузійної ємності.

## 4.2 Розв'язування

4.2.1 а). Прирівнюючи квазіпотенціали Фермі з обох боків переходу, обчислюємо:

$$\begin{aligned} U_0 = \psi_n - \psi_p &= U_T \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} = \\ &= 0,0258 \ln \frac{10^{21} \cdot 10^{20}}{(1,5 \cdot 10^{16})^2} = 0,51 \text{ В.} \end{aligned}$$

Формула, яка використана, справедлива в тому випадку, коли концентрація легуючих домішок суттєво переважає значення  $n_i$ .

б)  $U' = U_0 - U = 0,51 - (-10) = 10,51 \text{ В}; U' = eN_a x_p W / (2\epsilon\epsilon_0);$

$$\begin{aligned} W &= \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{N_a + N_d}{N_a \cdot N_d} U' \right)^{1/2} = \left( \frac{2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{10^{21} + 10^{20}}{10^{21} \cdot 10^{20}} \cdot 10,51 \right)^{1/2} = \\ &= 1,23 \cdot 10^{-5} \text{ м.} \end{aligned}$$

Розглядаючи разом умову електричної нейтральності  $x_p \cdot N_a = x_n \cdot N_d$  і рівність  $W = x_n + x_p$ , отримуємо:

$$x_n = \frac{WN_d}{N_a + N_d} = 1,118 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$x_p = \frac{WN_d}{N_a + N_d} = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

Значення  $W$ ,  $x_n$  і  $x_p$ , відповідають, як це і повинно бути, негативному зміщенню. Дійсно, якщо напруга на діод не подана, то

$$W_0 = \left( \frac{2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{10^{20} + 10^{21}}{10^{20} + 10^{21}} \cdot 0,51 \right) = 0,27 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Негативне зміщення повинно бути достатньо велике, тому що  $x_n = 10x_p$ . Це можна пояснити, взявши до уваги умову електричної нейтра-

льності збідненої області переходу, а також рівність  $N_a = 10N_d$ . Тому, що концентрація акцепторів в  $p$ -області переважає концентрацію донорів в  $n$ -області, то для взаємної компенсації ефектів ширина області просторового заряду, яка прилягає до  $n$ -області, повинна бути меншою.

$$в) C_{бар} \approx \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{W} = \frac{1,06 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-8}}{1,23 \cdot 10^{-5}} = 0,085 \text{ пФ.}$$

$$г) U_{пер} = U_{np} + U_0 \cdot U_{np}, \text{ тому що } U_{np} \gg U_0,$$

$$E = \left[ \frac{2eU_{пер} N_a N_d}{\epsilon \epsilon_0 (N_a + N_d)} \right]^{1/2},$$

$$U_{np} \approx U_{пер} = \frac{E^2 \epsilon \epsilon_0 (N_a + N_d)}{2e N_a N_d} = \frac{(1,5 \cdot 10^7)^2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-10} (10^{20} + 10^{21})}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 10^{21}} = 820 \text{ В.}$$

$$4.2.2 \quad U' = U_0 - U; \quad U_0 = U_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0,026 \ln \frac{10^{20} 10^{21}}{(1,5 \cdot 10^{16})^2} = 0,577 \text{ В};$$

$$U' = 0,577 - (-10) = 10,577 \text{ В.}$$

При  $U = -10 \text{ В}$

$$W = \left[ \frac{2\epsilon \epsilon_0 (N_a \cdot N_d) U'}{e N_a N_d} \right]^{1/2} = \left( \frac{2 \cdot 1,062 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10,577}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21}} \right)^{1/2} = 5,29 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

При  $U = 0$   $W_0 = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

При  $U = -10 \text{ В}$  заряд  $Q = Ae N_d W / 2 = 4,23 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$  (тому, що  $N_a = N_d$ , то має місце рівність  $x_p = x_n = W/2$ ).

При  $U = 0$  заряд  $Q_0 = 9,73 \cdot 10^{-11} \text{ Кл.}$

Зворотний струм

$$I_{зс} = \frac{dQ_D}{dt}; \quad Q_D = Q - Q_0 = \int_0^t I_{зс} dt = I \cdot t;$$

$$t = \frac{Q - Q_0}{I} = \frac{423,52 - 97,28}{10^{-3}} \cdot 10^{-12} \approx 326 \cdot 10^{-9} \text{ c} = 326 \text{ нс.}$$

4.2.3 а). Дифузійна довжина електронів:

$$L_n = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2} = (20 \cdot 2 \cdot 10^{-7})^{1/2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Тому, що  $W_p = 100 \text{ мкм}$ , то  $W_p \gg L_n$ ; маємо діод з товстою базою. Використовуючи формули:

$$J = \left[ \frac{en_{p0}(-x_p)D_n}{L_n \operatorname{th}[(x_p - x_p)/L_n]} + \frac{eP_{n0}(x_n)D_p}{L_p \operatorname{th}[(x_n - x_n)/L_n]} \right] (e^{U/U_T} - 1),$$

$$I_{\text{нас}} = en_i^2 A \left( \frac{D_n}{N_a L_n} + \frac{D_p}{N_d L_p} \right), \text{ отримуємо}$$

$$I = I_n(0) = \frac{eAD_n}{L_n} n'_{p0}(0), \text{ звідки надмірна концентрація носіїв при } x=0$$

$$n'_{p0}(0) = \frac{IL_n}{eAD_n} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3} \cdot 20} = 7,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

На основі формули  $n'_p(x) = n'_{p0} \exp(-\frac{x}{L_n})$  маємо

$$n'_p(x) = n'_{p0}(0) e^{-x/L_n} = 7,5 \cdot 10^{14} e^{-x/(2 \cdot 10^{-3})} \text{ см}^{-3}.$$

$$\begin{aligned} \text{б) } Q_0 &= eA \int_0^{\infty} n'_p(x) dx = eAL_n n'_{p0}(0) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5 \cdot 10^{14} = \\ &= 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл.} \end{aligned}$$

в). Дифузійна провідність визначається як крутизна (пропорційна тангенсу кута нахилу) вольтамперної характеристики діода

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{r} = \frac{dI}{dU} = \frac{I_{\text{нас}}}{U_T} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) \approx \frac{I}{U_T},$$

звідки знаходимо диференційний опір  $r = U_T/I = 21,7 \text{ Ом}$  і у відповідності з  $C_{\text{диф}} = \tau_p I(U)/U_T$  дифузійну ємність

$$C_{\text{диф}} = \frac{\tau_p I}{U_T} = 8,8 \text{ нФ.}$$



### 4.3 Задачі

4.3.1 Германієвий  $p$ - $n$ -перехід має концентрацію домішок  $N_{\bar{a}}=10^{23} \cdot N_a$ , причому на кожні  $10^8$  атомів германію припадає один атом акцепторної домішки. Визначити контактну різницю потенціалів при температурі  $T=300\text{К}$ . Концентрації атомів германію  $N$  та іонізованих атомів  $n_i$  вважати рівними відповідно  $4,4 \cdot 10^{22}$  та  $2,5 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ .

4.3.2 Розв'язати попередню задачу для кремнієвого  $p$ - $n$ -переходу з такими ж концентраціями домішок. Концентрацію атомів кремнію  $N$  і власну концентрацію  $n_i$  вважати рівними відповідно  $5,0 \cdot 10^{22}$  і  $10^{10} \text{см}^{-3}$ .

4.3.3 Питомий опір  $p$ -області германієвого  $p$ - $n$ -переходу  $\rho_p=2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , а питомий опір  $n$ -області  $\rho_n=1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Визначити висоту потенціального бар'єра при  $T=300\text{К}$ . Вважати, що при даній температурі  $\mu_n=0,39 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p=0,19 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $n_i=2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

4.3.4 Розв'язати попередню задачу для кремнієвого  $p$ - $n$ -переходу з такими ж значеннями питомих опорів  $p$ - і  $n$ -областей. Вважати, що при  $T=300\text{К}$ ,  $\mu_n=0,14 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ;  $\mu_p=0,05 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ;  $n_i=10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

4.3.5 Визначити для температури  $T=300\text{К}$  контактну різницю потенціалів  $p$ - $n$ -переходу, що сформований у фосфіду індію, якщо рівноважні концентрації основних носіїв заряду в  $p$ - і  $n$ -областях однакові і дорівнюють  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а власна концентрація  $n_i=10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

4.3.6 Визначити контактну різницю потенціалів в  $p$ - $n$ -переході з арсеніду галію при кімнатній температурі, якщо концентрація основних зарядів у областях  $p$ - і  $n$ -типу однакова і дорівнює  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Порівняйте отриманий результат з контактною різницею потенціалів у кремнієвому  $p$ - $n$ -переході з аналогічним розподілом домішок. Власну концентрацію носіїв заряду при  $T=300\text{К}$  вважати рівною  $1,7 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  для арсеніду галію і  $10^{16} \text{ м}^{-3}$  для кремнію.

4.3.7 В структурі з германієвим  $p$ - $n$ -переходом питома провідність  $p$ -області  $\gamma_p=10^4 \text{ См/м}$  і питома провідність  $n$ -області  $\gamma_n=10^3 \text{ См/м}$ . Рухливості електронів і дірок в германії відповідно дорівнюють  $0,39$  і  $0,19 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

Вичислити контактну різницю потенціалів в переході при температурі  $T=300\text{K}$ , якщо власна концентрація  $n_i=2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

4.3.8 Використовуючи дані та результати попередньої задачі, знайти:  
а) густину зворотного струму насичення, а також відношення діркової складової зворотного струму насичення до електронної, якщо дифузійна довжина електронів і дірок  $L_n=L_p=10^{-3} \text{ м}$ ; б) напругу, при якій густина прямого струму  $j=10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

4.3.9 В структурі з кремнієвим  $p$ - $n$ -переходом питомий опір  $p$ -області  $\rho_p=10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а питомий опір  $n$ -області  $\rho_n=10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Вичислити контактну різницю потенціалів, якщо рухливість дірок і електронів відповідно дорівнює  $0,05$  і  $0,13 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , а власна концентрація  $n_i=1,38 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  при температурі  $300\text{K}$ .

4.3.10 В монокристалі напівпровідника довжиною  $0,2 \text{ мм}$  і площею поперечного перерізу  $A=10^{-6} \text{ м}^2$  утворений  $p$ - $n$ -перехід. На торцях зразка сформовані омичні контакти для підключення зовнішньої напруги, границя між  $n$ - і  $p$ -областями розташована посередині. Питомий опір  $p$ -області  $\rho_p=4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , час життя неосновних зарядів у ній  $\tau_n=75 \text{ нс}$ . Питомий опір  $n$ -області  $\rho_n=2,08 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , час життя дірок в ній  $\tau_p=150 \text{ нс}$ . Визначити: а) контактну різницю потенціалів; б) зворотний струм насичення; в) долю струму, що створюється дірками. При розрахунках вважати, що при  $T=300\text{K}$  рухливість електронів  $\mu_n=0,3 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , рухливість дірок  $\mu_p=0,15 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , власна концентрація носіїв заряду  $n_i=2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

4.3.11 Концентрація донорів і акцепторів в  $n$ - і  $p$ -областях різкого  $p$ - $n$ -переходу відповідно дорівнює  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  і  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Визначити контактну різницю потенціалів і густину зворотного струму насичення, вважаючи, що при кімнатній температурі коефіцієнти дифузії для неосновних електронів і дірок складають  $100$  і  $50 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  відповідно, а дифузійна довжина  $L_n=L_p=0,8 \text{ см}$ . Власну концентрацію носіїв заряду вважати рівною  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

4.3.12 Структура з кремнієвим  $p$ - $n$ -переходом має питому провідність  $p$ -області  $\gamma_p=10^3 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$  і питому провідність  $n$ -області  $\gamma_n=20 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Час життя неосновних носіїв заряду 5 і 1 мкс у  $p$ - і  $n$ -областях відповідно. Визначити: а) відношення діркової складової струму в  $p$ - $n$ -переході до електронної; б) густину зворотного струму насичення і густину струму через  $p$ - $n$ -перехід при прямій напрузі 0,3 В. Розрахунок проводити для температури  $T=300\text{К}$ , вважаючи, що власна концентрація носіїв заряду  $n_i=1,4\cdot 10^{16}\text{ м}^{-3}$ , рухливість електронів  $\mu_n=0,12\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , рухливість дірок  $\mu_p=0,05\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

4.3.13 Різкий  $p$ - $n$ -перехід сформований з матеріалу  $p$ -типу питомим опором  $\rho_p=1,3\cdot 10^{-3}\text{ Ом}\cdot\text{м}$  і з матеріалу  $n$ -типу питомим опором  $\rho_n=4,6\cdot 10^{-3}\text{ Ом}\cdot\text{м}$  при  $T=300\text{К}$ . Час життя неосновних носіїв заряду в матеріалі  $p$ - і  $n$ -типу 100 і 150 мкс відповідно, площа переходу  $A=1\text{мм}^2$ . Вчислити зворотний струм насичення з припущенням, що довжина  $p$ - і  $n$ -областей багато більша дифузійної довжини, якщо  $\mu_n=0,135\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ;  $\mu_p=4,8\cdot 10^{-2}\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ;  $n_i=6,5\cdot 10^{16}\text{ м}^{-3}$ .

4.3.14 Германієвий  $p$ - $n$ -перехід має зворотний струм насичення 1мкА, а кремнієвий перехід таких же розмірів – зворотний струм насичення  $10^8\text{А}$ . Вчислити і порівняти прямі напруги на переходах при кімнатній температурі і струмі 100мА.

4.3.15 При тих же умовах, що і у попередній задачі визначити і порівняти прямі та зворотні опори германієвого і кремнієвого  $p$ - $n$ -переходу. Вважати, що вимірювання зворотних струмів насичення проводились при зворотній напрузі  $U_{\text{зв}}=5\text{В}$ .

4.3.16 Струм, який проходить через  $p$ - $n$ -перехід при великій зворотній напрузі і  $T=300\text{К}$ , дорівнює  $2\cdot 10^{-7}\text{А}$ . Знайти струм при прямій напрузі 0,1 В.

4.3.17 Посередині напівпровідникового зразка довжиною 2 мм перерізом  $0,5\times 1\text{ мм}$  знаходиться  $p$ - $n$ -перехід. Питома провідність  $p$ -області  $\gamma_p=100\text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$ , питома провідність  $n$ -області  $\gamma_n=1\text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$ . При температурі 300К зворотний струм насичення  $p$ - $n$ -переходу дорівнює 5мкА. Вчислити напруги, при яких струм через перехід дорівнює 1 та 10мА. Уточнити

результати з врахуванням падіння напруги на об'ємних опорах  $p$ - і  $n$ -областей. Зміною опорів об'ємів областей при збільшенні рівня інжекції знехтувати.

4.3.18 Області  $p$  і  $n$  діода з різким кремнієвим переходом мають питомий опір 0,013 і 44,5 Ом·см відповідно. В умовах термодинамічної рівноваги при кімнатній температурі визначають висоту потенціального бар'єра, якщо  $\mu_n=1400 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_p=480 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $n_i=1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

4.3.19 Існує два діоди, один з яких виконаний з кремнію, а другий з германію. Вчисліть: а) висоту потенціального бар'єра в обох діодах, вважаючи, що концентрація легуючих домішок  $N_a=10^{17} \text{ см}^{-3}$  і  $N_d=10^{14} \text{ см}^{-3}$  в них однакова. Прийняти для кремнію  $n_i=1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  і для германію  $n_i=2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; б) висоту потенціального бар'єра і довжини  $x_n$  та  $x_p$  збіднених областей  $p$ - $n$ -переходу для кожного діода, вважаючи, що зворотне зміщення  $U=-10 \text{ В}$ .

4.3.20 Існує  $p$ - $n$ -перехід, легований домішками з концентрацією  $N_a=5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  і  $N_d=10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Використовуючи рівняння Пуассона, вчисліть: а) товщину області переходу, якщо максимальна напруженість електричного поля в ній складає  $10^7 \text{ В/м}$ ; б) внутрішню напругу, яка існує в області переходу. Вважати для матеріалу  $p$ - $n$ -переходу  $\epsilon \cdot \epsilon_0=12$ .

4.3.21 В деяку точку зразка кремнію з параметрами  $n_i=10^{16} \text{ м}^{-3}$  і  $N_d=10^{20} \text{ м}^{-3}$  інжектуються надмірні носії з концентрацією  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Вчислити відношення  $p/n$  в даній точці, а також процентну зміну параметрів  $p$  і  $n$  внаслідок інжекції. Який рівень інжекції низький або високий тут відбувається?

4.3.22 Кремнієвий  $p$ - $n$ -перехід при кімнатній температурі має концентрацію домішок  $N_a=10^{24} \text{ м}^{-3}$  і  $N_d=10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Вчислити: а) висоту потенціального бар'єра; б) максимальне значення зовнішньої напруги, при якій ще зберігається низький рівень інжекції. Відомо, що  $n_i=1,48 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ .

4.3.23 Різкий  $p$ - $n$ -перехід має площу поперечного перерізу  $A=1 \text{ мм}^2$ . Область  $p$  сильно легована, так що її питома провідність в декілька раз бі-

льна питомої провідності  $n$ -області. Питомий опір  $n$ -області 50м-см, а час життя неосновних носіїв заряду в ній  $\tau_p=50$ мкс. Визначити зворотний струм  $p$ - $n$ -переходу і пряму напругу при струмі 1мА.

4.3.24 Визначити при температурі  $T=300$ К контактну різницю потенціалів кремнієвого  $p$ - $n$ -переходу, якщо концентрація домішок  $N_a=2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$  і  $N_d=5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . Вважати концентрацію власних носіїв заряду  $n_i=10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

4.3.25 При температурі  $T=300$ К зворотний струм насичення  $p$ - $n$ -переходу в зразку арсеніду галію дорівнює 2,5мкА. Визначити опір  $p$ - $n$ -переходу при прямій напрузі 0,1В. Побудуйте прямі гілки вольт-амперної та вольт-омної характеристик цього  $p$ - $n$ -переходу.

4.3.26 Несиметричний  $p$ - $n$ -перехід з концентраціями домішок  $N_d \gg N_a$  змішений в зворотному напрямку. Вказати складову струму, яка буде найбільшою при цих умовах.

4.3.27 Яка з двох областей  $p$ - $n$ -переходу має більш високий питомий опір, якщо відомо, що число дірок, інжектованих через  $p$ - $n$ -перехід в одиницю часу, на декілька порядків більше числа електронів?

4.3.28 Визначити концентрацію акцепторних домішок в  $p$ -області електронно-діркового переходу і концентрацію донорних домішок в  $n$ -області, якщо відомо, що при  $T=300$ К питомі провідності областей:  $\gamma_n=1 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $\gamma_p=100 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ .

4.3.29 При прямій напрузі 0,1 В на  $p$ - $n$ -переході через нього проходить певний струм. Яким повинна бути пряма напруга, щоб струм збільшився в два рази? Розрахунок провести для кімнатної температури.

4.3.30 Яку напругу необхідно прикласти до  $p$ - $n$ -переходу при  $T=300$ К, щоб прямий струм через нього дорівнював зворотному струму насичення  $I_0$ ? При якій прямій напрузі прямий струм  $I_{np}=100I_0$ ?

4.3.31 Зворотний струм насичення германієвого  $p$ - $n$ -переходу площею  $A=1 \text{ мм}^2$  при температурі  $T=300$ К дорівнює 10мкА. Вважаючи, що струм обумовлений тільки електронами, вчислити дифузійну довжину електронів  $L_n$  в  $p$ -області. Рівень Фермі в  $p$ -області лежить на 0,5 еВ ниж-

че дна зони провідності, рухливість електронів  $\mu_n=0,39\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

4.3.32 Зворотний струм насичення  $p$ - $n$ -переходу при кімнатній температурі дорівнює  $10^{-14}\text{А}$ . При підвищенні температури до  $125^\circ\text{C}$  зворотний струм збільшився в  $10^5$  раз. Визначити напругу на переході при кімнатній температурі та температурі  $125^\circ\text{C}$ , якщо прямий струм через нього  $I=1\text{мА}$ .

4.3.33 В скільки разів зміниться бар'єрна ємність різкого  $p$ - $n$ -переходу при збільшенні зворотної напруги від 20 до 80В ?

4.3.34 Якщо до різкого  $p$ - $n$ -переходу прикласти змінну напругу амплітудою 5В, то максимальна ємність переходу дорівнює 2пФ. Визначити контактну різницю потенціалів і мінімальне значення ємності переходу, якщо при відсутності зовнішньої напруги вона дорівнює 1пФ.

4.3.35 Бар'єрна ємність різкого  $p$ - $n$ -переходу дорівнює 200пФ при зворотній напрузі 2В. Яка необхідна зворотна напруга, щоб вона зменшилась до 50пФ, якщо контактна різниця потенціалів  $U_0=0,82\text{В}$ ?

4.3.36 Вчислити бар'єрну ємність різкого  $p$ - $n$ -переходу, що виконаний в стержні арсеніду галію площею поперечного перерізу  $A=1\text{мм}^2$ . Ширина області об'ємного заряду  $W=2\cdot 10^{-4}\text{см}$ . Відносна діелектрична проникність напівпровідника  $\epsilon\cdot\epsilon_0=13,1$ .

4.3.37 В рівноважному стані висота потенціального бар'єра  $p$ - $n$ -переходу дорівнює 0,2В, концентрація акцепторних домішок  $N_a=3\cdot 10^{14}\text{см}^{-3}$  в  $p$ -області, що набагато менше концентрації донорних домішок  $N_d$  в  $n$ -області. Знайти бар'єрну ємність  $p$ - $n$ -переходу, яка відповідає зворотним напругам 0,1 і 10В, якщо площа переходу  $A=1\text{мм}^2$ . Вчислити ширину області об'ємного заряду  $p$ - $n$ -переходу для цих напруг. Чому вона буде дорівнювати при прямій напрузі 0,1В?

4.3.38 Як зменшується бар'єрна ємність різкого  $p$ - $n$ -переходу при збільшенні модуля напруги зміщення на 1В, якщо відомо, що при  $U=-5\text{В}$   $C_0=20\text{пФ}$ .

4.3.39 Германієвий діод має такі параметри:  $N_a=10^{18}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{16}\text{см}^{-3}$ ;  $A=10^{-3}\text{см}^2$ ;  $D_p=40\text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $T=300\text{К}$ ;  $n_i=2\cdot 10^{13}\text{см}^{-3}$ ;  $W=10^{-3}\text{см}$ . Вичислити: а) рівноважні концентрації носіїв в  $p$ - і  $n$ -областях; б) висоту потенціального бар'єра; в) зворотний струм насичення, нехтуючи електронною складовою струму ( $N_a \gg N_d$ ).

4.3.40 В кремнієвому різкому  $p$ - $n$ -переході  $n$ -область має питомий опір  $\rho_n=5\text{ Ом}\cdot\text{см}$ , час життя неосновних носіїв заряду в ній  $\tau_p=1\text{ мкс}$ ; для  $p$ -області:  $\rho_p=0,1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  $\tau_n=5\text{ мкс}$ . Знайти відношення діркової складової струму до електронної. Визначити густину струму, який протікає через перехід при прямій напрузі  $0,3\text{В}$ .

4.3.41 В різкому  $p$ - $n$ -переході площею  $A=10^{-6}\text{м}^2$  концентрація акцепторної домішки в  $p$ -області  $N_a=10^{24}\text{м}^{-3}$ , концентрація донорної домішки в  $n$ -області  $N_d=10^{22}\text{м}^{-3}$ . Рухливість дірок  $\mu_p=0,2\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , рухливість електронів  $\mu_n=0,4\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , дифузійна довжина неосновних носіїв заряду в областях:  $L_p=2\cdot 10^{-4}\text{м}$ ;  $L_n=3\cdot 10^{-4}\text{м}$ , відносна діелектрична проникність матеріалу  $\epsilon=16$ , власна концентрація носіїв заряду  $n_i=10^{19}\text{м}^{-3}$ . Вичислити для температури  $T=300\text{К}$ : а) концентрації для основних і неосновних носіїв заряду; б) питому провідність  $p$ - і  $n$ -областей; в) контактну різницю потенціалів; г) коефіцієнти дифузії для носіїв заряду обох типів; д) зворотний струм насичення; е) ширину області об'ємного заряду  $p$ - $n$ -переходу при зворотній напрузі  $10\text{В}$ ; є) бар'єрну ємність  $p$ - $n$ -переходу при зворотній напрузі  $10\text{В}$ ; ж) відношення діркової складової струму через  $p$ - $n$ -перехід до електронної.

4.3.42 В кремнієвому різкому  $p$ - $n$ -переході з концентраціями домішок  $N_a=10^{20}\text{м}^{-3}$  і  $N_d=10^{22}\text{м}^{-3}$  лавинний пробій настає при напруженості електричного поля  $6\cdot 10^7\text{В/м}$ . Вичислити ширину  $p$ - $n$ -переходу і зворотну напругу, необхідну для початку виникнення пробою. Відносна діелектрична проникність кремнію  $\epsilon=12$ .

4.3.43 Кремнієвий  $p$ - $n$ -перехід має площу поперечного перерізу  $A=1\text{мм}^2$  і бар'єрну ємність  $C_\epsilon=300\text{пФ}$  при зворотній напрузі  $U_\epsilon=10\text{В}$ . Ви-

значити максимальну напруженість електричного поля в області об'ємного заряду. Як зміниться ємність, якщо зворотну напругу збільшити в два рази? Відносна діелектрична проникність матеріалу  $\epsilon = 12$ .

4.3.44 Бар'єрна ємність різкого  $p$ - $n$ -переходу дорівнює 25пФ при зворотній напрузі 5В. Як зміниться ємність, якщо зворотну напругу збільшити в два рази? Відносна діелектрична проникність кремнію  $\epsilon = 12$ .

4.3.45 Маємо кремнієвий діод з такими параметрами:  $N_a = 2,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_d = 2,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $A = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ;  $W = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ ;  $\tau_p = 50 \text{ мкс}$ . До діода прикладена пряма напруга зміщення  $U = 50 \text{ В}$ . Вчисліть: а) опір постійному струму; б) диференційний опір; в) дифузійну ємність  $C_{\text{диф}}$ , якщо  $D_p = 13 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  і  $G_{\text{диф}} = 1/0,026 \text{ мСм}$ .

4.3.46 Визначити бар'єрну ємність і ширину  $p$ - $n$ -переходу, сформованого в арсеніді індію, при  $T = 300 \text{ К}$ , якщо концентрація основних носіїв заряду:  $n_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , відносна діелектрична проникність  $\text{InAs}$  –  $\epsilon = 14,6$ . площа поперечного перерізу  $p$ - $n$ -переходу  $A = 0,01 \text{ см}^2$ . До  $p$ - $n$ -переходу прикладена зворотна напруга  $U_{\text{об}} = 100 \text{ В}$ .



## ТЕМА 5 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

### 5.1 Вправи для самоперевірки

5.1.1 Для даного транзистора типу *p-n-p* задано:  $I_{pE}=1$  мА;  $I_{nE}=0,01$  мА;  $I_{pK}=0,98$  мА;  $I_{nK}=0,001$  мА. Вичислити: а) статичний коефіцієнт передачі струму бази; б) ефективність емітера або коефіцієнт інжекції; в) струм бази та коефіцієнт передачі струму в схемах ЗБ і ЗЕ (загальна база і загальний емітер); г) значення струмів  $I_{KBO}$  і  $I_{KEO}$ ; д) значення коефіцієнта передачі струму  $\beta$  та  $I_B$ , якщо  $I_{pK}=0,99$  мА; е) значення  $\beta$  та  $I_B$ , якщо  $I_{pK}=0,99$  мА та  $I_{nE}=0,005$  мА. Як зміняться значення  $\beta$  та  $I_B$ , коли струм  $I_{nE}$  збільшиться?

5.1.2 Кремнієвий транзистор типу *n-p-n* при кімнатній температурі має концентрацію домішок в базі  $1,3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  і в колекторі  $1,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Товщина активної області бази при  $U_{KB}=0$  складає 1 мкм. а) Поясніть, що при  $U_{KB}=3,6$ В товщина активної області бази змінюється на 10%. Вважайте, що  $n_i=10^{16} \text{ м}^{-3}$ . б) Вчисліть бар'єрну ємність переходу база-колектор, якщо площа переходу  $10^{-8} \text{ м}^2$  і напруга  $U_{KB}=0$ .

5.1.3 Два біполярних транзистори типу *p-n-p* відрізняються тим, що товщина бази одного з них складає 0,9 товщини бази другого. Покажіть, що струми в обох транзисторах однакові в тому випадку, коли напруга база-емітер другого транзистора на 0,0027В більша, ніж відповідна напруга першого транзистора. Вказівки: 1) вважайте, що ефективна товщина бази значно менша дифузійної довжини; 2) вважайте, що рекомбінації носіїв у базі не відбувається; 3) припустіть, що струм  $I_E$  складається із струму  $I_1$  (інжектваного з емітера в базу) і струму  $I_2$  (інжектваного з бази в емітер); 4) вважайте, що концентрація домішок у базі суттєво менша, ніж в емітері, і що перехід емітер-база можна замінити простим діодом.

5.1.4 Кремнієвий транзистор типу *p-n-p* має параметри:

$N_{aE} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{aB} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{aK} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $W = 1 \text{ мкм}$ ;  $A = 3 \text{ мм}^2$ ;  $U_{EB} = +0,5 \text{ В}$ ;  
 $U_{BK} = -5 \text{ В}$ ;  $D_{nE} = 2 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $D_{pB} = 10 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $D_{nK} = 35 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $\tau_{nE} = 10^{-8} \text{ с}$ ;  $\tau_{pB} = 10^{-7} \text{ с}$ ;  
 $\tau_{nK} = 10^{-6} \text{ с}$ . Напруга пробую в схемі 3Е  $U_{np(3E)} = 50 \text{ В}$ . Вчисліть: а) товщину  
 нейтральної області  $W_B$  в базі; б) концентрацію  $p(n)(0)$  для неосновних но-  
 сіїв коло переходу емітер-база; в) заряд  $Q_B$  неосновних носіїв в області ба-  
 зи; г) складові струмів  $I_{pE}$ ;  $I_{pK}$ ;  $I_{nE}$ ;  $I_{nK}$ ;  $I_{pB}$ ; д)  $I_E$ ,  $I_K$  та  $I_B$ ; е) ефективність емі-  
 тера, коефіцієнти передачі струму в схемах 3Б і 3Е; є) поясніть, як можна  
 поліпшити параметри  $\gamma$  і  $\beta_T$ ; ж) напругу  $U_{np(KE)}$  в схемі 3Е, враховуючи, що

параметр  $a=5$ , який входить в формулу  $M = \left[ 1 - \left( \frac{|U_{KB}|}{U_{npKB}} \right)^a \right]^{-1}$ ; Вважайте,

що  $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

5.1.5 Транзистор типу *n-p-n* має товщину активної області бази 0,2 мкм. Концентрація домішок скрізь однорідна, за винятком перехідних областей поблизу емітера і колектора. Крім напруги основного джерела, прикладеного до колектора, існує джерело напруги 5В, яке підключене до активної області бази (без врахування контактної різниці потенціалів і падіння напруги на колекторній області). а). Визначіть, при якому мінімальному рівні легування бази можна уникнути пробую між колектором і емітером. б). Знайдіть постійну часу бази. в). Визначіть постійну часу Гуммеля  $N_G = N_B W_B$ . г). Вважаючи, що через наявність домішок область емітера вироджена, а концентрація домішок в колекторній області  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , визначіть загальний заряд в базі, додавши сюди заряди в збіднених областях переходів емітер-база та колектор-база, при яких реалізується знайдена в п. в) значення постійної Гуммеля. Вважається, що в області емітера значення  $U_{FnE} = 0,55 \text{ В}$ . Вихідні дані:  $\epsilon\epsilon_0 = 1,035 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см}$ ;  $D_B = 15 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_i = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

## 5.2. Розв'язування

$$5.2.1 \text{ а) } \beta_T = I_{pK}/I_{pE} = 0,98; \text{ б) } \gamma = \frac{I_{pE}}{I_{pE} + I_{nE}} = \frac{1}{1 + 0,01} = 0,99; \text{ в) } \alpha \approx \gamma \beta_T =$$

$$= 0,99 \cdot 0,98 = 0,97; I_E = 1 + 0,01 = 1,01 \text{ мА}; I_K = I_{pK} + I_{nK} = 0,98 \text{ мА}; I_B = I_E - I_K = 29,9 \text{ мкА};$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 32,67; \text{ г) } I_{KBO} \approx I_{nK} = 1 \text{ мкА}; I_{KE0} \approx I_{KBO} \cdot (\beta + 1) = 3,36 \text{ мкА}; \text{ д) }$$

$$I_{pK} = 0,99 \text{ мА} \rightarrow \alpha = \frac{0,99}{1 + 0,01} = 0,9802 \rightarrow \beta = 49,5; I_B = (I_{nE} + I_{pE}) -$$

$$-(I_{nK} + I_{pK}) = 19,9 \text{ мкА}; \text{ е) } \alpha = \frac{0,99}{1 + 0,005} = 0,98507; \beta = 6,6; I_B = 14,9 \text{ мкА}.$$

Якщо струм  $I_{nE}$  зростає, то величина  $\beta$  падає, тому, що зменшується значення коефіцієнта інжекції  $\gamma$ . Дійсно, якщо зменшити  $\gamma$ , то знижується  $\alpha$  (тому, що  $\alpha = \gamma \beta_T$ ) і значення  $\beta$  (бо  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ ). Струм  $I_B$  можна знайти використавши результати, що отримані в п. в), д) і е).

5.2.2 В цій задачі на конкретному матеріалі обговорюється ефект Ерлі, суть якого в тому, що товщина базової області зменшується від дії зворотної напруги, яка прикладена до колектора.

$$U_V = U_T \ln \frac{NaNd}{n_i^2} = 0,026 \ln \frac{1,3 \cdot 10^{23} \cdot 1,3 \cdot 10^{24}}{(10^{16})^2} = 0,912 \text{ В};$$

$$X_n N_{dB} = X_p N_{aK} \rightarrow X_n = (N_{aK} / N_{dB}) X_p = 10 X_p; X_p + X_n = W \rightarrow X_n = (10/11)W; \\ X_p = (1/11)W;$$

$$W = \left[ \frac{2\epsilon\epsilon_0(U_0 - U)}{e} \left( \frac{1}{NaK} + \frac{1}{NaB} \right) \right]^{1/2};$$

$$W^2 = \frac{2 \cdot 1,062 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left( \frac{1}{1,3 \cdot 10^{24}} + \frac{1}{1,3 \cdot 10^{23}} \right) (U_0 - U) = 1,123 \cdot 10^{-14} (U_0 - U).$$

Якщо  $U_{KB} = 0$ , то  $U = 0$  і  $U_0 = 0,912 \text{ В}$ , звідки

$$W_0^2 = 1,123 \cdot 10^{-14} \cdot 0,912 \text{ м}^2; \quad W_0 = 1,012 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Якщо товщина бази зростає на 10% відносно товщини при нульовій напрузі, то це відповідає росту її на  $0,1 \cdot 10^{-6} = 10^{-7} \text{ м}$ . Таким чином, товщина

збідненої області переходу колектор-база при 10%-ному зростанні товщини бази складе  $W \cdot W_0 + 10^{-7} = 2,012 \cdot 10^{-7}$  м. Тому, що  $(W')^2 = 1,123 \cdot 10^{-14} U_{КБ}$ , знаходимо

$$U_{КБ} = (2,012 \cdot 10^{-7})^2 / (1,123 \cdot 10^{-14}) = 3,6 \text{ В.}$$

$$б) C_{\text{бар}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{W_0} = \frac{1,062 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-8}}{1,012 \cdot 10^{-7}} \approx 10 \text{ нФ.}$$

5.2.3 Приведені вихідні дані цілком реальні для звичайних транзисторів. Таким чином,  $\alpha \approx \gamma \beta \approx 1 \rightarrow I_E \approx I_K$ . Відомо, що товщина базової області слабо впливає на величину струму  $I_{КБ0}$ , який приблизно однаковий для різних транзисторів одного і того ж типу. Крім того, значення  $I_{КБ0}$  дуже мало впливає на струм  $I_K$ . Тому можна стверджувати, що при однакових струмах  $I_E$  обох транзисторів однаковими будуть і їх режими. Якщо вважати, що величина  $I_E$  залежить тільки від інжекції носіїв із емітера в базу, то стосовно до діодів емітер-база, що зміщені в прямому напрямку, отримаємо

$$I_{E1} \approx \frac{eAD_p P_{n0}}{W_1} (e^{U_{EB1}/U_T} - 1), \quad I_{E2} \approx \frac{eAD_p P_{n0}}{W_2} (e^{U_{EB2}/U_T} - 1).$$

Тому, що напруга прикладена до діода в прямому напрямку, приблизно можна вважати, що  $\exp(U_{FB}/U_T) - 1 \approx \exp(U_{FB}/U_T)$ . За умови задачі,  $I_{E1} = I_{E2}$  тоді

$$\frac{1}{W_1} \exp\left(\frac{U_{EB1}}{U_T}\right) = \frac{1}{W_2} \exp\left(\frac{U_{EB2}}{U_T}\right) \quad \text{і} \quad \frac{W_2}{W_1} = \exp\left(\frac{U_{EB2} - U_{EB1}}{U_T}\right)$$

$$\text{Відповідно з умовою } W_1 = 0,9W_2. \text{ Звідси } U_{EB2} - U_{EB1} = U_T \ln(1/0,9) = 0,026 \cdot 0,105 = 0,0027 \text{ В.}$$

$$5.2.4 \text{ а). Перехід емітер-база: } U_0 = U_T \ln(N_{aE} N_{dB} / n_i^2) = 0,856 \text{ В:}$$

$$X_{BE} = \left[ \frac{2\epsilon \epsilon_0}{e} \cdot \frac{N_{aE}}{N_{dB}} \cdot \frac{U_0 - 0,5}{N_{aE} + N_{dB}} \right]^{1/2} = 0,215 \text{ мкм. Перехід база-колектор:}$$

$$U_0 = U_T \ln(N_{dB} \cdot N_{aK} / n_i^2) = 0,026 \ln \frac{10^{16} \cdot 10^{15}}{(1,45 \cdot 10^{10})^2} = 0,635 \text{ В.}$$

$$X_{BK} = \left[ \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{10^{15}}{10^{16}} \cdot \frac{0,635 + 5}{10^{15} + 10^{16}} \right]^{1/2} = 0,258 \text{ мкм; } W_B = W - X_{BE} - X_{BK} =$$

$$= 1 - 0,215 - 0,258 = 0,527 \text{ мкм.}$$

$$\text{б) } P_n(0) = P_{n0} \exp\left(\frac{U_{\text{ББ}}}{U_T}\right) = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{10^{16}} \exp\left(\frac{0,5}{0,026}\right) = 5,18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

$$\text{в) } Q_{\text{Б}} = eAW_{\text{Б}}P_n(0)/2 = 6,4 \cdot 10^{-13} \text{ Кл.}$$

$$\text{г) Область бази: } L_{\text{рБ}} = (D_{\text{рБ}} \cdot \tau_{\text{рБ}})^{1/2} = (10 \cdot 10^{-7})^{1/2} = 10^{-3} \text{ см.}$$

$$P_{\text{Б0}} = n_i^2 / N_d = 21 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}. \quad \text{Область эмитера: } L_{\text{нЕ}} = (2 \cdot 10^{-8})^{1/2} = 14,1 \cdot 10^{-3} \text{ см;}$$

$$n_{\text{Е0}} = 2,1 \cdot 10^{20} / (5 \cdot 10^{18}) = 42 \text{ см}^{-3}. \quad \text{Область колектора:}$$

$$L_{\text{нК}} = (35 \cdot 10^{-6})^{1/2} = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ см; } n_{\text{К0}} = 2,1 \cdot 10^{20} / 10^{15} = 21 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}. \quad \text{Складові струмів:}$$

$$I_{\text{рЕ}} = A \left( -eD_{\text{рЕ}} \frac{dp_{\text{нЕ}}}{dx} \Big|_{x=0} \right) = \frac{eAD_{\text{рЕ}}P_{\text{нЕ0}}}{L_{\text{рЕ}}} \left( \text{cth} \frac{W_{\text{Б}}}{L_{\text{рЕ}}} \right) \left[ \left( e^{U_{\text{ББ}}/U_T} - 1 \right) + \frac{1}{\text{ch}(W_{\text{Б}}/L_{\text{рЕ}})} \right] =$$

$$= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 21 \cdot 10^3}{3,16 \cdot 10^{-3}} \times \left( \text{cht} \frac{0,527}{10} \right) \left[ \left( e^{-0,5/0,026} - 1 \right) + 1 / \text{ch}(0,0527) \right] =$$

$$= 1,4725 \cdot 10^{-2} \text{ А;}$$

$$I_{\text{рК}} = A \left( -eD_{\text{рК}} \frac{dp_{\text{нК}}}{dx} \Big|_{x=W_{\text{Б}}} \right) = \frac{eAD_{\text{рК}}P_{\text{нК0}}}{L_{\text{рК}}} \cdot \frac{1}{\text{sh}(W_{\text{Б}}/L_{\text{рК}})} \left[ \left( e^{U_{\text{нЕ}}/U_T} - 1 \right) + \text{ch} \left( \frac{W_{\text{Б}}}{L_{\text{рК}}} \right) \right] =$$

$$= 1,4705 \cdot 10^{-3} \text{ А;}$$

$$I_{\text{нЕ}} = A \left( -eD_{\text{нЕ}} \frac{dn_{\text{Е}}}{dx} \Big|_{x=-r_{\text{нЕ}}} \right) = \frac{eAD_{\text{нЕ}}n_{\text{Е0}}}{L_{\text{нЕ}}} \left( e^{U_{\text{ББ}}/U_T} - 1 \right) = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 42}{4,1 \cdot 10^{-3}} \cdot$$

$$2,42114 \cdot 10^8 = 3,462 \cdot 10^{-7} \text{ А;}$$

$$I_{\text{нК}} = A \left( \frac{-eD_{\text{нК}}n_{\text{К0}}}{L_{\text{нК}}} \right) = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 35 \cdot 21 \cdot 10^4}{1,87 \cdot 10^{-2}} = 1,88 \cdot 10^{-12} \text{ А;}$$

$$I_{\text{рБ}} = I_{\text{рЕ}} - I_{\text{рК}} = 2,0429 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

$$\text{д) } I_{\text{Е}} = I_{\text{рЕ}} + I_{\text{нЕ}} = 1,47294 \cdot 10^{-3} \text{ А, } I_{\text{К}} = I_{\text{рК}} + I_{\text{нК}} = 1,47055 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{нЕ}} + I_{\text{рБ}} - I_{\text{нК}} = 2,3891 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

$$\epsilon) \gamma = I_{pE}/I_E = 0,99976; \beta_I = I_{pK}/I_{pE} = 0,99861; \alpha = I_K/I_E \approx \gamma\beta_I = 0,99837;$$

$$\beta = h_{FE} = 615,5.$$

е) Щоб підвишити коефіцієнт інжекції  $\gamma$ , концентрацію необхідно зробити значно більш високою, ніж у базі. Величина параметра  $\beta_I$  буде збільшена, якщо товщина бази буде малою в порівнянні з товщиною емітера.

ж) Коефіцієнт множення струму колектора

$$M = \left[ 1 - \left( \frac{|U_{KB}|}{U_{KBnp}} \right)^\alpha \right]^{-1}.$$

Також можна записати  $M(\alpha I + I_{KB0}) = I; I = MI_{KB0}/(1 - \alpha M)$ .

Вважаючи, що  $\alpha M = 1$ , отримаємо

$$U_{np(KЕ)} = U_{np(KБ)}(1 - \alpha)^{1/\alpha} \approx U_{np(KБ)}(\beta)^{-1/\alpha} = 50(615,5)^{-1,5} = 13,8В.$$

$$5.2.5 \text{ а) } N_B = \frac{2\epsilon\epsilon_0 U}{W_B^2 \cdot e} = \frac{2 \cdot 1,035 \cdot 10^{-12} \cdot 5}{0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,62 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

$$\text{б) } \tau_B = W_B^2 / (2D_B) \approx 0,2 \cdot 10^{-4} / (2 \cdot 15) = 1,33 \cdot 10^{-11} \text{ с.}$$

$$\text{в) } N_G = N_B W_B = 1,62 \cdot 10^{17} \cdot 0,2 \cdot 10^{-4} = 3,24 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}.$$

г). Для області бази

$$U_{Fp} = U_T \ln(N_B / n_i) = 0,026 \ln \frac{1,62 \cdot 10^{17}}{1,2 \cdot 10^{10}} = 0,425В.$$

Контактна різниця потенціалів на емітерному переході

$$U_{EБ0} = U_{FnE} + U_{Fp} = 0,55 + 0,425 = 0,975В.$$

Концентрація носіїв в області просторового заряду в переході емітер-база буде  $Q_{EB}/e$ , причому  $Q_{EB} = (2\epsilon\epsilon_0 N_B U_{EБ0})^{1/2} =$

$$= (2 \cdot 1,035 \cdot 10^{-12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,62 \cdot 10^{17} \cdot 0,975)^{1/2} = 2,29 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Тому,  $Q_{EB}/l = 1,43 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Для області колектора

$$U_{FnK} = 0,026 \ln[10^{16} / (1,2 \cdot 10^{10})] = 0,353В;$$

$$U_{KB0} = 0,353 + 0,425 = 0,778В.$$

Товщина області просторового заряду в переході колектор-база

$$X_n + X_p = W_{\text{КБ}} = \left[ \frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \left( \frac{N_B + N_K}{N_B \cdot N_K} \right) U_{\text{КБ0}} \right]^{1/2} =$$

$$= \left[ \frac{2 \cdot 1,035 \cdot 10^{-12} (1,62 \cdot 10^{17} + 10^{16}) 0,778}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,62 \cdot 10^{17} \cdot 10^{16}} \right]^{1/2} = 3,27 \cdot 10^{-5} \text{ см};$$

$$X_p = \frac{W_{\text{КБ}}}{1 + N_B / N_K} = \frac{32,7 \cdot 10^{-6}}{1 + 1,62 \cdot 10^{17} / 10^{16}} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ см}.$$

Концентрація носіїв у збудженій області переходу колектор-база

$$Q_{\text{КБ}}/e = N_B \cdot X_p = 1,62 \cdot 10^{17} \cdot 1,9 \cdot 10^{-6} = 3,08 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}.$$

Підсумкова концентрація носіїв у базі

$$3,24 \cdot 10^{12} + 1,43 \cdot 10^{12} + 0,31 \cdot 10^{12} = 4,98 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}.$$

### 5.3 Задачі

5.3.1 У якому режимі працює транзистор *n-p-n*, що включений за схемою 3Е, якщо напруга  $U_{\text{БЕ}}=0,4\text{В}$ , а напруга  $U_{\text{КЕ}}=0,3\text{В}$ ?

5.3.2 У якому режимі працює транзистор *n-p-n*, що включений за схемою 3Е, якщо напруга  $U_{\text{БЕ}}=0,4\text{В}$ , а напруга  $U_{\text{КЕ}}=10\text{В}$ ?

5.3.3 У якому режимі працює транзистор *n-p-n*, що включений за схемою 3Е, якщо напруга  $U_{\text{БЕ}}=-0,4\text{В}$ , а напруга  $U_{\text{КЕ}}=-10\text{В}$ ?

5.3.4 У якому режимі працює транзистор *n-p-n*, що включений за схемою 3Е, якщо напруга  $U_{\text{БЕ}}=-0,3\text{В}$ , а напруга  $U_{\text{КЕ}}=-0,4\text{В}$ ?

5.3.5 Транзистор *n-p-n* включений за схемою 3Б.  $U_{\text{ЕБ}}=-0,5\text{В}$ ,  $U_{\text{КБ}}=12\text{В}$ . Визначити напругу колектор-емітер.

5.3.6 Транзистор *p-n-p* включений за схемою 3Е. Напруга  $U_{\text{БЕ}}=-0,8\text{В}$ ;  $U_{\text{КЕ}}=-10\text{В}$ . Визначить напругу колектор-база.

5.3.7 Виводи електронів транзистора марковані А, Б, В. Струми, що знімаються з цих виводів, дорівнюють  $I_A=1 \text{ мА}$ ;  $I_B=20 \text{ мкА}$ ,  $I_B=1,02 \text{ мА}$ . З якими електродами транзистора з'єднані виводи і чому дорівнює коефіціє-

ент передачі постійного струму бази транзистора (прийняти  $I_{K0}=0$ ).

5.3.8 У транзистора  $n-p-n$  надмірна концентрація електронів на емітерному переході дорівнює  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Площі переходів  $A$  однакові і дорівнюють  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , ефективна ширина бази  $W_B=4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ; рухливість електронів  $\mu_n=0,39 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  при  $T=300 \text{ К}$ . Визначити струм колектора.

5.3.9 В  $p-n-p$  транзисторі площі емітерного і колекторного переходів однакові і дорівнюють  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Надмірна концентрація дірок в емітерному переході дорівнює  $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , коефіцієнт дифузії дірок  $D_p=4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ . Визначити струм емітера, обумовлений дірками, якщо ширина бази  $W_B=2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ .

5.3.10 Концентрації домішок транзистора  $p-n-p$  і ширина бази виконані так, що тільки один відсоток дірок, що інжектовані з емітера, губиться при рекомбінації у базі. Визначити коефіцієнт інжекції.

5.3.11 Концентрація домішок у всіх областях транзистора  $p-n-p$  і ширина бази така, що тільки 1% дірок, інжектуються з емітера, губиться при рекомбінації у базі. Нехтуючи струмами витоку, знайти коефіцієнт передачі струму емітера, якщо електронна складова струму емітера  $I_{nE}=0,01 I_E$ , а коефіцієнт множення в колекторному переході  $M=1$ .

5.3.12 В транзисторі  $n-p-n$   $N_{dE}=10^{24} \text{ м}^{-3}$  і  $N_{dB}=10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а рухливості  $\mu_n=0,4 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  і  $\mu_p=0,2 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Визначити відношення діркового струму до електронного на переході емітер-база.

5.3.13 Діод на основі транзистора  $n-p-n$  з вільним колектором має прямий струм  $I_E=2 \text{ мА}$ ,  $I_{KBO}=2 \text{ мкА}$ ;  $I_{EBO}=1,6 \text{ мкА}$ ,  $\alpha=0,98$ . Визначити напругу на переходах.

5.3.14 Прямий струм емітера  $n-p-n$  транзистора  $I_E=2 \text{ мА}$ , колекторне коло розірвано. Визначити напругу емітер-колектор при  $I_{KBO}=2 \text{ мкА}$ ;  $I_{EBO}=1,8 \text{ мкА}$ ,  $\alpha=0,98$ .

5.3.15 Визначити постійний струм бази  $p-n-p$  транзистора при  $T=300 \text{ К}$ , коли  $I_K=1 \text{ мА}$ ;  $\tau_p=1,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $\mu_p=0,2 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $W_B=10^{-5} \text{ м}$ .

5.3.16 Визначити коефіцієнти передачі за постійним струмом  $\alpha$ ,  $h_{21E}$  і



зворотний струм колектора  $I_{КЕ0}$  в транзисторі за схемою з загальним емітером, коли  $I_{К}=1\text{мА}$ ,  $I_{Б}=20\text{мкА}$ ,  $I_{КБ0}=10^{-8}\text{А}$ .

5.3.17 У транзистора  $p-n-p$   $\alpha=0,98$ ;  $I_{КБ0}=5\text{мкА}$ ;  $I_{ЕБ0}=3,57\text{мкА}$ . Визначити струми транзистора  $I_{К}$  та  $I_{Е}$ , якщо обидва переходи включені в зворотному напрямку.

5.3.18 Транзистор  $p-n-p$  має параметри:  $I_{PE}=1\text{мА}$ ;  $I_{nE}=0,01\text{мА}$ ;  $I_{pK}=0,98\text{мА}$ ;  $I_{nK}=0,001\text{мА}$ . Визначити статистичні коефіцієнти передачі струму бази та інжекції.

5.3.19 Визначити струм колектора транзистора, якщо струм бази  $I_{Б}=20\text{мкА}$ ,  $I_{КБ0}=1\text{мкА}$ ,  $\gamma=0,99$   $\beta^*=0,995$ , а  $M=1$ .

5.3.20 База транзистора з концентрацією домішок  $10^{21}\text{м}^{-3}$  має коефіцієнт передачі струму на низькій частоті  $\beta=30$ . Визначити час життя неосновних носіїв заряду у базі, якщо коефіцієнт інжекції  $\gamma=1$ , а коефіцієнт дифузії  $D_n=0,0093\text{ м}^2\text{с}^{-1}$ .

5.3.21 Транзистор  $p-n-p$  має параметри:  $\alpha=0,99$ ;  $\alpha_i=0,9$ ;  $I_{ЕБ0}=10^{-6}\text{А}$ ;  $I_{КБ0}=1,1\cdot 10^{-6}\text{А}$ ,  $T=300\text{К}$ . Визначити струми  $I_{Е}$ ,  $I_{К}$ ,  $I_{Б}$ , якщо  $U_{ЕБ}=0,25\text{В}$  і  $U_{КБ}=0,2\text{В}$ .

5.3.22 Транзистор  $p-n-p$  має параметри:  $\alpha=0,99$ ;  $\alpha_i=0,9$ ;  $I_{ЕБ0}=10^{-6}\text{А}$ ;  $I_{КБ0}=1,1\cdot 10^{-6}\text{А}$ ,  $T=300\text{К}$ . Визначити струми  $I_{Е}$ ,  $I_{К}$ ,  $I_{Б}$ , якщо  $U_{ЕБ}=0,25\text{В}$ ;  $E_{КБ}=-10\text{В}$ .

5.3.23 Транзистор  $p-n-p$  має параметри:  $\alpha=0,99$ ,  $\alpha_i=0,9$ ,  $I_{ЕБ0}=10^{-6}\text{А}$ ,  $I_{КБ0}=1,1\cdot 10^{-6}\text{А}$ ,  $T=300\text{К}$ . Визначити струми  $I_{Е}$ ,  $I_{Б}$ ,  $I_{К}$ , якщо  $U_{ЕБ}=-5\text{В}$  і  $U_{КБ}=-10\text{В}$ .

5.3.24 Транзистор типу  $n-p-n$  має площу поперечного перерізу  $A=10^{-6}\text{м}^2$  і концентрацію надмірних неосновних носіїв у базі біля емітерного переходу  $n_{nb}=10^{20}\text{м}^{-3}$ . Активна товщина бази  $W_b=2\cdot 10^{-5}\text{м}$ , рухливість електронів  $\mu_n=0,39\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $T=300\text{К}$ . Знайти струм колектора, вважаючи транзистор ідеальним.

5.3.25 Транзистор типу  $n-p-n$  з концентрацією домішок  $N_a=10^{18}\text{см}^{-3}$  має розміри активної області бази  $1,0\times 1,0\times 0,2\text{ мкм}$ . Скільки електронів мі-

стить базова область при рівновазі?

5.3.26 Транзистор *n-p-n* має концентрацію домішок  $N_a=10^{18}\text{см}^{-3}$  і розміри активної області бази  $1\times 1\times 0,2$  мкм. Визначити кількість домішкових атомів у базі, враховуючи, що всі атоми іонізовані.

5.3.27 Транзистор *n-p-n* з концентрацією атомів кремнію в  $N_d=5\cdot 10^{23}\text{см}^{-3}$  має розміри активної області бази  $1\times 1\times 0,2$  мкм. Визначити кількість атомів кремнію в базі.

5.3.28 Транзистор *n-p-n* працює в активній області і має такі параметри: активна товщина бази  $W_B=1,5$  мкм;  $N_{aB}=10^{17}\text{см}^{-3}$ ;  $N_{dE}=10^{19}\text{см}^{-3}$ ;  $L_{pE}=1,5\cdot 10^{-3}$  см;  $L_{pB}=2\cdot 10^{-3}$  см; час життя неосновних носіїв:  $\tau_n=2\cdot 10^{-7}$  с;  $\tau_p=10^{-6}$  с;  $n_i=1,45\cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ . Визначити коефіцієнт передачі  $\beta$  транзистора. Коефіцієнт передачі  $\alpha$  транзистора розрахувати за формулою

$$\alpha \approx 1 - \frac{D_{pE} D_{nE} W_B}{D_{nB} n_{pB} L_{pE}} - \frac{W_B^2}{2L_{nB}^2}$$

5.3.29 Який коефіцієнт інжекції *n-p-n* транзистора в схемі з 3Е, з однорідною базою і параметрами:  $N_a=10^{16}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{18}\text{см}^{-3}$ ;  $W_B=0,5$  мкм;  $D_p=0,5D_n$ ;  $L_p=1$  мкм;  $L_n=10$  мкм?

5.3.30 Визначити коефіцієнт переносу через базу в схемі 3Е для *n-p-n* транзистора з однорідною базою і параметрами:  $N_a=10^{16}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{18}\text{см}^{-3}$ ;  $W_B=0,5$  мкм;  $D_p=0,5D_n$ ;  $L_p=1$  мкм;  $L_n=10$  мкм.

5.3.31 Визначити коефіцієнт передачі струму в схемі 3Е для транзистора типу *n-p-n* з однорідною базою і параметрами:  $N_a=10^{16}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{18}\text{см}^{-3}$ ;  $W_B=0,5$  мкм;  $D_p=0,5D_n$ ;  $L_p=1$  мкм;  $L_n=10$  мкм.

5.3.32 Визначити диференційний опір *p-n-p* транзистора при  $U_{KB}=-16$  В у якого площі обох переходів однакові  $A=1\cdot 10^{-6}\text{м}^2$ ,  $D_{pB}=4,7\cdot 10^{-3}\text{м}^2/\text{с}$ . Надмірна концентрація дірок біля емітерного переходу  $2\cdot 10^{20}\text{м}^{-3}$ , ширина бази  $W_B=2\cdot 10^{-5}$  м. Товщина збідненого носіями заряду колекторного переходу  $W_K = 1 + \sqrt{|U_{KB}|} \cdot 10^{-6}$  м.

5.3.33 Площі переходів *p-n-p* транзистора  $A=10^{-6}\text{м}^2$ , коефіцієнт дифузії дірок у базі  $D_p=4,7\cdot 10^{-3}\text{м}^2\text{с}^{-1}$ . Концентрація дірок на емітерному переході

$2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ,  $U_{КБ} = -1 \text{ В}$ . Визначити струм колектора, якщо ширина бази  $W_B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ , а товщина збідненого шару колекторного переходу  $W_{КБ} = (1 + \sqrt{|U_{КБ}|}) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

5.3.34 Як впливає на ефективність емітера і коефіцієнт переносу збільшення питомої провідності області бази в двох випадках: а) при пропорційній зміні питомої провідності емітерної області; б) при незмінній питомій провідності емітерної області?

5.3.35 Поясніть, чому при зміні питомої провідності в області бази змінюється коефіцієнт передачі струму емітера, навіть якщо ефективність емітера підтримується постійною одночасною зміною питомої провідності емітерної області.

5.3.36 Покажіть, що в активному режимі в транзисторі  $p-n-p$  відношення діркового і електронного струмів  $I_{pE} / I_{nE}$ , що протікає через емітерний перехід, прямо пропорційне відношенню питомих провідностей матеріалів  $p$ - і  $n$ -типу.

5.3.37 Через транзистор типу  $p-n-p$  тече постійний струм і концентрація дірок в базі більша за рівноважне значення. Що буде відбуватися в результаті цього з концентрацією електронів у базі?

5.3.38 Розрахувати і побудувати графік залежності струму емітера від напруги  $U_{EB}$  ідеального транзистора, у якого коефіцієнт передачі емітерного струму  $\alpha = 0,98$ , зворотний струм колектора  $I_{КБ0} = 2 \text{ мкА}$ , зворотний струм емітера  $I_{ЕБ0} = 1,6 \text{ мкА}$ , якщо: а) напруга колекторного переходу  $U_{КБ} = 0$ ; б) на колекторний перехід подано зворотну напругу  $10 \text{ В}$ . Розподіленим опором бази знехтувати.

5.3.39 Визначити емітерний і колекторний струми для ідеального транзистора, що працює в режимі відсічки, якщо зворотний струм колектора  $I_{КБ0} = 5 \text{ мкА}$ , зворотний струм емітера  $I_{ЕБ0} = 3,6 \text{ мкА}$ , коефіцієнт передачі струму емітера  $\alpha = 0,96$ .

5.3.40 У деякого  $p-n-p$  транзистора  $\alpha = 0,98$ ;  $\alpha_r = 0,8$ ;  $I_{КБ0} = 10^{-9} \text{ А}$ ;  $I_{ЕБ0} = 0,816 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ . Визначити: а) струми  $I_E$  і  $I_K$  при  $U_{EB} = -0,36 \text{ В}$  і  $U_{КБ} = 10 \text{ В}$ ; б)

напругу колектор-емітер, якщо  $I_E=10\text{mA}$  і  $I_K=5\text{mA}$  (режим насичення).

5.3.41 При зворотній напрузі на емітерному переході при температурі навколишнього середовища  $T=25^\circ\text{C}$  струм емітера дорівнює  $10^{-12}\text{A}$ . Чому буде дорівнювати (теоретично) струм емітера при прямій напрузі  $0,7\text{В}$ ? Який це транзистор германієвий чи кремнієвий? Впливом температури на струм знехтувати.

5.3.42 Транзистор, який має  $\alpha=0,995$ ,  $\alpha_f=0,1$ ,  $I_{EBO}=10^{-14}\text{A}$ ;  $I_{KBO}=10^{13}\text{A}$ , включений в схему на рис. 5.1. Визначити напругу  $U_{KE}$ , а також струми  $I_E$ ;  $I_K$ ;  $I_B$ .

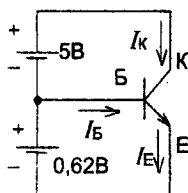


Рисунок 5.1

5.3.43 У кремнієвого  $p-n-p$  транзистора ширина бази  $W=1\text{мкм}$ , питомий опір бази  $\rho_b=0,5\text{Ом}\cdot\text{см}$ , питомий опір колектора значно менший питомого опору бази. Визначити напругу проколу бази.

5.3.44 При досить великій напрузі на колекторному  $p-n$ -переході його збіднений шар проникає крізь базу і колектор змикається з емітером. Це явище (прокол бази) виникає в деякому германієвому транзисторі при зворотній напрузі на колекторному переході  $30\text{В}$ . Вважаючи, що колектор легований домішками значно більше, ніж база, яка містить концентрацію домішок  $10^{21}\text{м}^{-3}$ , визначити ширину бази при відсутності напруги зміщення. Відносна діелектрична проникність германію  $\epsilon=16$ .

5.3.45 Транзистор типу  $p-n-p$  має ефективну ширину бази  $W=20\text{мкм}$  при деяких напругах на переходах. Ширина емітерної області  $5\text{мкм}$ , і її питомий опір  $\rho_E=50\cdot 10^{-6}\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Ефективний час життя  $\tau_p=20\text{мкс}$  і коефіцієнт

дифузії дірок  $D_p=0,0047 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Вичислити коефіцієнт передачі струму бази  $\beta$  цього транзистора.

5.3.46 Визначити остаточну напругу транзистора  $U_D=U_{KE}$  в режимі насичення, який працює при  $T=300\text{K}$  і має такі параметри:  $I_K=10\text{мкА}$ ,  $I_E=20\text{мкА}$ ;  $\alpha=0,95$ ,  $\alpha_r=0,7$ . Вмикання пряме, опорамі об'ємів областей колектора і емітера знехтувати.

## ТЕМА 6 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРНІ СТРУКТУРИ ІС

### 6.1 Вправи для самоперевірки

6.1.1 а). Вчисліть густину заряду  $Q_{SS}$ , що виникає на межі  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  в деякій МОН-структурі, яка має металізацію акцепторів  $N_a=10^{16}\text{см}^{-3}$  і товщину оксидного шару 0,1мкм. Відомо, що напруга плоских зон  $U_{nz}=-2,3\text{В}$ . б). До затвора МОН-конденсатора, розглянутого в п. а), прикладена негативна напруга в декілька сотих долів вольт; прилад знаходиться при досить високій температурі. Визначити густину заряду  $Q_B$ , що пов'язана зі збідненою областю, а також густину рухливого заряду  $Q_n$ , який витіснений на поверхню, якщо напруга плоских зон складає в даному випадку  $U_{nz}=-1,3\text{В}$ . Вихідні дані:  $\epsilon=8,85\cdot 10^{-14}\text{Ф/см}$ ;  $\epsilon_{ок}=4$ ;  $U_T=0,026\text{В}$ ;  $n_i=1,5\cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ ;  $e\cdot\Phi_{мок}=3,2e\text{В}$ ;  $e\cdot\Phi_{\text{Si-SiO}_2}=3,25e\text{В}$ .

6.1.2 Ідеальний МОН-конденсатор має шар оксиду  $\text{SiO}_2$  товщиною 0,1 мкм і підкладку з кремнію  $p$ -типу, з концентрацією акцепторів  $10^{16}\text{см}^{-3}$ . Вчисліть питому ємність у випадках: а)  $U_3=2\text{В}$ ;  $f=1\text{Гц}$ ; б)  $U_3=20\text{В}$ ;  $f=1\text{Гц}$ ; в)  $U_3=20\text{В}$ ;  $f=1\text{МГц}$ . Вихідні дані:  $\epsilon_{ок}=4$ ;  $\epsilon_n=12$ ;  $n_i=1,5\cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ .

6.1.3 Маємо ідеальний МОН-конденсатор з кремнієвою підкладкою  $p$ -типу і концентрацією  $N_a=10^{15}\text{см}^{-3}$ . Діелектричний шар  $\text{SiO}_2$  має товщину 100нм. Затвор з алюмінію характеризується параметром  $\Phi_{ms}=-0,9\text{В}$ . Густина заряду на межі розділу  $Q_{ss}=5\cdot 10^{11}\cdot e=8\cdot 10^{-8}\text{Кл/см}^2$ . Вчисліть максимальну товщину збідненої області, ємність, обумовлену діелектриком, заряд у збідненій області ( $Q_s=Q_B$ ), порогову напругу, мінімальну ємність, а також порогову напругу з врахуванням впливу напруги плоских зон.

6.1.4 а). Вчисліть порогову напругу МОН-транзистора з каналом  $p$ -типу і орієнтацією меж розділу (111). Транзистор має алюмінієвий затвор, товщину оксидного шару 120нм, концентрацію легуючих домішок у підкладці  $N_{d2}=3\cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$ . Попередня концентрація  $N_{d1}=10^{15}\text{см}^{-3}$ . Зі зростанням концентрації змінюється рівень Фермі  $W_F$ , тому що

$$\left. \begin{aligned} W_{F_1} - W_i &= kT \ln \frac{N_{d1}}{n_i} \\ W_{F_2} - W_i &= kT \ln \frac{N_{d2}}{n_i} \end{aligned} \right\} \Rightarrow eU_F = W_{F_2} - W_{F_1}.$$

Це приводить до того, що змінюється величина  $\Phi_{\text{ин}} = -0,3 + U_F$ . При орієнтації (111) поверхнева густина заряду, що локалізований на межі напівпровідник-оксид,  $Q_{\text{св}} = 5 \cdot 10^{11} \cdot e = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ . Вважається, що  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

б). Виконайте попередню вправу для МОН-транзистора з каналом  $n$ -типу, орієнтацією межі розділу (100) і товщиною оксидного шару 1017 нм при двох значеннях концентрації легуючої домішки:  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  і  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Який режим роботи транзистора в кожному з цих випадків? Внесіть поправку в значення  $\Phi_{\text{ин}}$ , яка виникає внаслідок того, що концентрація носіїв у каналі змінюється від рівня  $N_{a1} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до рівня  $N_{a2} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ :  $\Phi_{\text{ин1}} = \Phi_{\text{ин}} + U_F = -0,9 + U_T \ln(N_{a1}/N_{a2})$ , де  $N_{a2} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

6.1.5 Польовий МОН-транзистор з каналом  $p$ -типу працює в режимі збагачення і має такі параметри:  $b = \omega = 50 \text{ мкм}$ ;  $l = 5 \text{ мкм}$ ,  $x_{\text{ок}} = 0,1 \text{ мкм}$ ;  $U_{\text{пор}} = 1 \text{ В}$ ;  $\epsilon_{\text{ок}} = 4$ ;  $\mu_p = 190 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . а). Вчисліть струм  $I_c$ , опір каналу  $r_c = 1/q_c$  і крутизну  $S$ , якщо прилад працює в лінійному режимі при напругах  $U_3 = 3 \text{ В}$  і  $U_c = 0,1 \text{ В}$ . б). Визначіть значення  $I_{c \text{ нас}}$  та  $S_{\text{нас}}$ , вважайте, що транзистор працює при напругах  $U_3 = -4 \text{ В}$  і  $U_c = -5 \text{ В}$ .

6.1.6 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$ -переходом і каналом  $n$ -типу має такі параметри:  $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_a = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;  $a = 1 \text{ мкм}$ ;  $l = 10 \text{ мкм}$ ;  $b = 400 \text{ мкм}$ . Вчисліть: а) товщину каналу ( $2a - 2h$ ) в тих випадках, коли заземленим електродом буде сток, витік або затвор; б) опір каналу у випадках, вказаних в п. а); в) напругу відсічки  $U_{\text{відс}}$ ; г) напругу насичення  $U_{c \text{ нас}}$  при заземленому витіці та напрузі  $U_3 = -1 \text{ В}$ ; д) струм насичення  $I_{c \text{ нас}}$  при  $U_3 = -1 \text{ В}$  і  $U_c = 3 \text{ В}$ . Вихідні дані:  $\epsilon_i = 12$ ;  $\mu_n = 1350 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

## 6.2 Розв'язування

6.2.1 а)  $U_{нз} = -2,3B = \Phi_{мн} - Q_{SS}/C_0$ ;  $Q_{SS} = C_0 (\Phi_{мн} + 2,3)$ ;

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ок}}{x_{ок}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4}{10^{-5}} = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2; e\Phi_{мн} = e\Phi_{м0} - e\Phi_{н0};$$

$$\Phi_{мн} = 3,2 - (3,25 + 0,55 + U_F) = -0,6 - U_F; U_F = U_T \ln(N_d/n_i) =$$

$$= 0,026 \ln(10^{15}/1,5 \cdot 10^{10}) = 0,29\text{В}; \Phi_{мн} = -0,6 - 0,29 = -0,89\text{В};$$

$$Q_{SS} = C_0(0,89 + 2,3) = 3,54 \cdot 10^{-8} \cdot 3,19 = 11,29 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2.$$

б)  $Q_B = C_0(\Phi_{мн} - U'_m) = 3,54 \cdot 10^{-8} (0,89 + 1,3) = 7,75 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;

$$Q_n = Q_{SS} - Q_B = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2.$$

6.2.2 а)  $U_{пор} = 2U_F - Q_B/C_0$ ;

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ок}}{x_{ок}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4}{10^{-5}} = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$U_{S1} = U_n = 2U_F = U_T \ln(N_d/n_i) = 0,672\text{В}; Q_B = -(4e\epsilon_0 \epsilon_n N_d U_F)^{1/2} = 4,72 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2;$$

$$U_{пор} = 0,672 + \frac{4,72 \cdot 10^{-8}}{3,54 \cdot 10^{-8}} = 2,01\text{В}.$$

При  $U_j < +2B < U_{пор}$  МОН-конденсатор працює в режимі збіднення. Питома ємність:

$$C = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{2C_0^2 U_j}{eN_d \epsilon_0 \epsilon_n}\right)^{1/2}} = \frac{3,54 \cdot 10^{-8}}{\left[1 + \frac{2(3,54 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12}\right]^{1/2}} = 1,77 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

б). При  $U_j = +20\text{В}$  і досить низькій частоті  $f = 1\text{Гц}$ ,  $C = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ .

в). Якщо  $U_j = +20\text{В}$  і частота  $f = 1\text{МГц}$ , то питома ємність дорівнює ємності при пороговій напрузі:

$$C = C_{пор} = \frac{3,54 \cdot 10^{-8}}{\left[1 + \frac{2(3,54 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 2,01}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12}\right]^{1/2}} = 1,76 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

6.2.3  $U_F = U_T \ln(N_d/n_i) = 0,026 \ln(10^{15}/1,5 \cdot 10^{10}) = 0,29\text{В};$



$$\omega_{\max} = 2 \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_n U_F}{e N_a} \right)^{1/2} = 2 \left( \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 0,29}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15}} \right)^{1/2} = 0,87 \text{ мкс};$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ок}}{x_{ок}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4}{10^{-5}} = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$Q_B = Q_S = -q N_a \omega_{\max} = -1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15} \cdot 0,87 \cdot 10^{-4} = 1,39 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2;$$

$$U_{\text{пор}} = 2U_F - \frac{Q_S}{C_0} = 2 \cdot 0,29 + \frac{1,39 \cdot 10^{-8}}{3,45 \cdot 10^{-8}} = 0,98 \text{ В.}$$

При такій пороговій напрузі

$$C = C_S = \frac{\epsilon_0 \epsilon_n}{\omega_{\max}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12}{0,87 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$C_{\min} = \frac{C_0 \cdot C_S}{C_0 + C_S} = \frac{3,45 \cdot 1,2}{3,45 + 1,2} 10^{-8} = 0,89 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$U'_{\text{пор}} = \Phi_{\text{ин}} + 2U_F - (Q_{SS} + Q_S) / C_0 = -0,9 + 0,576 - \frac{5 \cdot 10^{11} \cdot 1,6 \cdot 10^{19} - 1,39 \cdot 10^{-8}}{3,45 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= -2,24 \text{ В.}$$

6.2.4 а)

$$eU_F = W_{F_2} - W_{F_1} = kT \ln(N_{d_2} / N_{d_1}) = 0,026 \ln \left( \frac{3 \cdot 10^{15}}{10^{15}} \right) = 0,03 \text{ eВ.}$$

$U_F = 0,03 \text{ В}$ . При  $x_{ок} = 120 \text{ нм}$  питома ємність

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ок}}{x_{ок}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4}{10^{-5}} = 2,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$U_n = U_s = -2U_F = -2U_T \ln(N_{d_2} / n_i) = -2 \cdot 0,026 \ln \left( \frac{3 \cdot 10^{15}}{1,4 \cdot 10^{16}} \right) = -0,64 \text{ В};$$

$$Q_B = (2\epsilon_0 \epsilon_n e N_{d_2} |2U_F|)^{1/2} = (2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 0,64)^{1/2} =$$

$$= 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2;$$

$$U_{\text{пор}} = \Phi_{\text{ин}} - \frac{Q_{SS}}{\epsilon_0 \epsilon_{ок}} + U_s - \frac{Q_B}{C_0} = -0,27 - \frac{5 \cdot 10^{11} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2,84 \cdot 10^{-8}} - 0,64 - \frac{3,61 \cdot 10^{-8}}{2,84 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= -5 \text{ В.}$$

$$б) C_0 = \frac{3,85 \cdot 8,85 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-6}} = 3,41 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$\frac{Q_{sv}}{C_0} = \frac{10^{11} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3,41 \cdot 10^{-8}} = 0,47 \text{ В. При } N_{a1} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

$$\Phi_{\text{ин1}} = \Phi_{\text{ин}} + U_T \ln(N_{a2} / N_{a1}) = -0,9 + 0,026 \ln\left(\frac{10^{15}}{5 \cdot 10^{14}}\right) = -0,88 \text{ В};$$

$$U_{n1} = 2U_{F1} = 2U_T \ln(N_{a1} / n_i) = 2 \cdot 0,026 \ln\left(\frac{5 \cdot 10^{14}}{1,4 \cdot 10^{10}}\right) = 0,55 \text{ В};$$

$$\frac{Q_{B1}}{C_0} = \frac{(2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 5 \cdot 10^{14} \cdot 0,55)^{1/2}}{3,41 \cdot 10^{-8}} = 0,28 \text{ В};$$

$$U_{\text{пор}} = -0,8 \text{ В} - 0,47 + 0,55 + 0,28 = -0,52 \text{ В. При } N_{a2} = 10^{15} \text{ см}^{-3}:$$

$$\Phi_{\text{ин2}} = -0,9 + 0,026 \ln\left(\frac{10^{15}}{10^{16}}\right) = -0,96 \text{ В}; U_{n2} = 2 \cdot 0,026 \ln\left(\frac{10^{16}}{1,4 \cdot 10^{10}}\right) = 0,7 \text{ В.}$$

$$\frac{Q_{B2}}{C_0} = \frac{(2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 10^{16} \cdot 0,7)^{1/2}}{3,41 \cdot 10^{-8}} = -1,43 \text{ В};$$

$U_{\text{пор}} = -0,96 - 0,47 + 0,7 + 1,43 = 0,7 \text{ В}$ . Таким чином  $U_{\text{пор1}} < 0$ , тобто МОН-структура з каналом  $n$ -типу перебуває в режимі збагачення і проводить струм при напрузі  $U_s = 0$ . В той же час  $U_{\text{пор2}} > 0$  при цьому МОН-структура перебуває в режимі збіднення і проводить струм лиш у випадку, коли  $U_s > 0,7 \text{ В}$ .

6.2.5 а)

$$I_c = \frac{b}{L} \mu_p C_0 \left[ (U_3 - U_{\text{пор}}) U_C - \frac{1}{2} U_C^2 \right] =$$

$$= 10 \cdot 190 \cdot 3,54 \cdot 10^{-8} [(-3 + 1)(-0,1) - 0,5 \cdot 0,01] = 3,12 \text{ мкА};$$

$$q_c = \frac{b}{L} \mu_p C_0 |U_3 - U_{\text{пор}} - U_C| = 10 \cdot 190 \cdot 3,54 \cdot 10^{-8} |-3 - (-1) - (-0,1)| =$$

$$1,28 \cdot 10^{-4} \text{ см}; \quad \tau_c = 1/q_c = 7,825 \text{ нс};$$

$$S = \frac{b}{L} \mu_p C_0 |U_C| = 10 \cdot 190 \cdot 3,54 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 = 6,73 \text{ мкА/В}.$$

$$\text{б) } I_{c \text{ нас}} = \frac{b}{L} \mu_p C_0 \frac{(U_3 - U_{\text{пор}})^2}{2} = 0,303 \text{ мА}.$$

$$S_{\text{нас}} = \frac{b}{L} \mu_p C_0 |U_3 - U_{\text{пор}}| = 0,202 \text{ мА/В.}$$

$$6.2.6 \text{ а) } U_0 = U_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0,026 \ln \frac{4 \cdot 10^{15} \cdot 10^{18}}{2,25 \cdot 10^{20}} = 0,793 \text{ В;}$$

$$h = \left( \frac{2\epsilon_o \epsilon_n U_o}{e N_d} \right)^{1/2} = \left( \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 12 \cdot 0,793}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{15}} \right)^{1/2} = 0,513 \text{ мкм.}$$

Товщину каналу  $2a = 2h = 0,974 \text{ мкм.}$

$$б) R = \frac{L}{e \mu_n N_d b (2a - 2h)} = \frac{10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1350 \cdot 4 \cdot 10^{15} \cdot 0,974 \cdot 10^{-4}} = 297 \text{ Ом.}$$

$$в) U_{\text{відс}} = -\frac{e N_d (2a)^2}{8 \epsilon_o \epsilon_n} - U_0 = 3,01 + 0,793 = -2,22 \text{ В.}$$

$$г) U_{c \text{ нас}} = \frac{e N_d (2a)^2}{8 \epsilon_o \epsilon_n} - U_0 + U_3 = 3,01 - 0,793 - 1 = 1,217 \text{ В.}$$

$$д) G_0 = \frac{b e \mu_n N_d (2a)}{L} = 40 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1350 \cdot 4 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 6,91 \text{ мСм;}$$

$$I_{C_{\text{в}}} = -\frac{1}{3} (U_{\text{відс}} - U_0) G_0 = -6,91 \cdot 10^{-3} (-3,01) \cdot \frac{1}{3} = 6,94 \text{ мА;}$$

$$I_{c \text{ нас}} = I_{C_{\text{в}}} \left[ 1 - 3 \frac{U_3 - U_o}{U_{\text{відс}} + U_o} + 2 \left( \frac{U_3 + U_o}{U_{\text{відс}} + U_o} \right)^{3/2} \right] = 6,94 \left[ 1 - 3 \frac{1,793}{3,01} + 2 \left( \frac{1,793}{3,01} \right)^{3/2} \right] = 0,92 \text{ мА.}$$

## 6.3 Задачі

6.3.1 а). Знайдіть вирази для заряду  $Q_b$ , що пов'язаний зі збідненою областю, поверхневого потенціалу  $U_s$  і напруженості електричного поля на поверхні  $E(x=0)$  як функції концентрації акцепторної домішки в режимі сильної інверсії. б). Зобразіть графічно залежності, отримані в п. а), при зміні концентрації акцепторних атомів від  $10^{14}$  до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Зауважте, що  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

6.3.2 Існує деяка МОН-структура типу  $Al-SiO_2-Si$  з підкладкою  $p$ -типу. Вичисліть густину заряду  $Q_B$ , якщо відомо, що напруга Фермі складає  $U_F = 0,25V$ , а концентрація  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

6.3.3 Ідеальна МОН-структура має підкладку з кремнію  $p$ -типу з концентрацією  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Товщина оксидного шару  $x_{ок} = 0,2 \text{ мкм}$ , затвор із алюмінію. Коли затвору надають деякий заряд, на поверхні кремнію виникає збіднена зона товщиною  $\omega = 0,65 \text{ мкм}$ . Внаслідок ефекту збіднення на поверхні утворюється електричне поле напруженістю  $E = 10^4 \text{ В/см}$ . Власна концентрація  $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Вичисліть: а) потенціал поверхні; б) напругу між затвором і "землею" (корпусом). Про що свідчить знак цієї напруги?

6.3.4 У структурі з параметрами задачі 6.3.3 визначити порогову напругу, враховуючи, що в розглядуваному випадку густина індукованого рухливого заряду  $Q_n = 0$ .

6.3.5 Для структури 6.3.3 вичислити ємність при малих сигналах і на високих частотах в режимі сильної інверсії. Вважати, що  $\epsilon_{ок} = 4$ , а  $\epsilon_n = 12$ .

6.3.6 Вичисліть напругу плоских зон для системи  $Al-SiO_2-Si$ , яка залежить лише від різниці робіт виходу. Підкладка  $p$ -типу, що знаходиться при  $T = 300K$ , має концентрацію дірок  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Густиною заряду  $Q_{SS}$  на поверхні можна знехтувати. Вихідні дані:  $e\Phi_{мін} = 3,2eV$ ;  $e\Phi_{мо} = 3,25eV$ ;  $E_{qn} = 1,1eV$ ;  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

6.3.7 Деяка МОН-структура створена на кремнієвій підкладці  $p$ -типу з орієнтацією (111). Концентрація акцепторної домішки  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , товщина оксидного шару  $x_{ок} = 120 \text{ нм}$ , затвор виконано з алюмінію. Вичисліть порогову напругу, якщо відомо, що при даній орієнтації поверхнева густина заряду складає  $4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ . Вихідні параметри:  $\Phi_{мо} = 3,2V$ ;  $\Phi_{но} = U_F + 3,8V$ .

6.3.8 Структура МОН має кремнієву підкладку  $p$ -типу, леговану акцепторною домішкою з концентрацією  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , орієнтація кристалу (111). Товщина оксидного шару  $1,2 \text{ мкм}$ , затвір виконано з алюмінію. Густина поверхневого заряду на межі оксид-напівпровідник  $Q_{SS} = 5 \cdot 10^{11} e^-$

$=8 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>. Знайдіть порогову напругу, якщо відомо, що  $n_i = 1.5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>;  $e\Phi_{\text{мо}} = 3,2$  еВ;  $e\Phi_{\text{юо}} = 3,25$  еВ.

6.3.9 У МОН-структурі, що виготовлена з кремнію  $n$ -типу з концентрацією домішки  $N_{\sigma} = 5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, яка має товщину оксидного шару  $x_{\text{ок}} = 100$  нм і алюмінієвий затвор, порогова напруга  $U_{\text{пор}} = -2,5$  В. Вчисліть значення величини  $Q_{\text{SS}}/e$ , що являє собою концентрацію носіїв на поверхні.

6.3.10 Структура МОН має підкладку з кремнію  $p$ -типу з концентрацією домішки  $N_{\sigma} = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> і оксидний шар товщиною 112 нм. Максимальна питома смність в режимі малого сигналу на високих частотах складас 30 нФ/см<sup>2</sup>. При  $U_j = 3$  В (напруга збігається з  $U_{\text{пн}}$ ) і потенціалі  $U_s = 0,52$  В, який постійний в режимі інверсії. Вчисліть порогову напругу і відповідну смність  $C_{\text{min}}$ , якщо максимально досягувана товщина збідненої області  $\omega_{\text{п}} = 1,17$  мкм.

6.3.11 Використовуючи дані задачі 6.3.10 вчислити: а) густину заряду  $Q_{\text{SS}}$  з врахуванням зарядів тільки в оксидному шарі; б) густину заряду в збідненій області, інверсному шарі, оксидному шарі і металі при  $U_j = 0$ . Відомо, що  $e\Phi_{\text{мін}} = -0,3$  еВ.

6.3.12 Конденсатори типу МОН мають підкладку з концентраціями домішки  $N_{\sigma} = 10^{14}$ ;  $10^{15}$  і  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Вчисліть для кожного з трьох указаних значень концентрації: а) максимальну товщину області просторового заряду; б) порогові напруги, вважаючи, що  $\Phi_{\text{мін}} = -0,1$  В;  $C_{\sigma} = 3,45 \cdot 10^{-8}$  Ф/см<sup>2</sup>;  $x_{\text{ок}} = 100$  нм;  $Q_{\text{SS}} = 1,6 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>.

6.3.13 Вчисліть напругу плоских зон для таких розподілів густини позитивного заряду: а) рівномірний розподіл в напрямку поперек оксидного шару з густиною  $1,5 \cdot 10^{15} e = 2,4 \cdot 10^{-4}$  Кл/см<sup>2</sup>; б) ступінчастий розподіл з нульовою густиною в межах половини відстані від затвора до підкладки і з постійною густиною  $3 \cdot 10^{15} e = 4,8 \cdot 10^{-4}$  Кл/см<sup>2</sup> в залишковій області до межі розділу між оксидним шаром і напівпровідником; в) лінійний розподіл, що починається з нульової густини на затворі і досягає  $3 \cdot 10^{15} e =$

$=4,8 \cdot 10^{-4}$  Кл/см<sup>2</sup> на межі розділу. Товщина оксидного шару 80 нм, відносна діелектрична проникність підкладки дорівнює 3,9.

6.3.14 Маємо МОН-транзистор з каналом *p*-типу, у якого  $N_d = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>;  $Q_{SS} = 3,45 \cdot 10^{11} = 8 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>: а) вичисліть напругу  $U_{пор}$ , якщо товщина оксидного шару  $x_{ок} = 0,1$  мкм. Повторіть розрахунок при  $x_{ок} = 1$  мкм. б) використайте рівняння:

$$I_c = \frac{b}{l} \mu_p c_0 \left[ (U_z - U_{пор}) U_c - \frac{1}{2} U_c^2 \right],$$

побудуйте стоко-затворні характеристики транзисторів з параметрами, вказаними в п. а). Вважайте, що струм  $I_{c,нас}$  постійний після переходу за точку відсічки. Покажіть, що  $\mu_p = 150$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $b/l = 5$ . в) Для оцінки частотних властивостей МОН-транзистора використовують поняття граничної частоти  $f_{гр} = S / (2pC_3b \cdot l)$ , де питома ємність затвора  $C_3$  збігається з ємністю  $C_0$  при конкретній напрузі. Виразіть величину  $f_{гр}$  далі від початку характеристики через параметри матеріалів і розміри приладу. Знайдіть значення  $f_{гр}$  для транзистора, описаного в п. а), при  $l = 1$  мкм.

6.3.15 МОН-транзистор з каналом *p*-типу має параметри:  $b/l = 5$ ;  $C_0 = 3,45 \cdot 10^{-8}$  Ф/см<sup>2</sup>;  $\mu_p = 200$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $U_c = +5$ В;  $U_z - U_{пор} = 3$ В. Найдіть значення  $S$  і  $S_{ниж}$ .

6.3.16 Визначіть максимальну поверхневу густину рухливого заряду дірок  $Q_p$ , яка може зпостерігатися у МОН-конденсаторі з алюмінієвим затвором при інжекції на межі *Si-SiO<sub>2</sub>*. Підкладка з кремнію *n*-типу легована з концентрацією домішки  $N_d = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, товщина оксидного шару 100 нм. На затвор подано імпульс напруги з амплітудою -10В, напруга на межі розділу стає по меншій мірі рівною -2В. Відомо, що  $Q_{SS} = 5 \cdot 10^{10}$  Кл/см<sup>2</sup>;  $\Phi_{ми} = -0,3$ В.

6.3.17 МОН-транзистор з каналом *p*-типу створений на кремнієвій підкладці *n*-типу з концентрацією домішки  $N_d = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Затвор з алюмінію, підзатворним діелектриком служить шар оксиду кремнію товщиною

$x_{ок}=150$  нм. Відомо, що  $Q_{SS}=2 \cdot 10^{11} e=3,2 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>;  $\Phi_{ми}=-0,25$ В. Вичислити значення параметрів  $\omega_n$ ,  $U_n$  і  $U_{пор}$ .

6.3.18 Маємо кремнієвий МОН-транзистор з каналом *n*-типу з такими параметрами:  $N_d=10^{17}$  см<sup>-3</sup>;  $\Phi_{ми}=-0,95$ В;  $Q_{SS}=5 \cdot 10^{11} e = 8 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>;  $x_{ок}=100$  нм. Вичисліть порогову напругу.

6.3.19 Повторіть 6.3.18 відносно транзистора з каналом *p*-типу при концентрації  $N_d=10^{17}$  см<sup>-3</sup> і тих же величинах параметрів  $Q_{SS}$  і  $x_{ок}$ . Нову величину  $U_{пор}$  визначіть, враховуючи зміну рівня Фермі  $W_F$  (зміна параметра  $eU_F$  складає 0,407eВ).

6.3.20 Польовий МОН-транзистор з каналом *n*-типу має такі параметри:  $\epsilon_{ок}=4$ ;  $x_{ок}=100$  нм;  $b/l=10$ ;  $\mu_n=1000$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $U_{пор}=0,5$ В. а). Вичисліть струм насичення при  $U_3=4$ В. б). Виведіть рівняння для вихідної характеристики, що описує залежність струму витoku від напруги на стоці, якщо витік і підкладка заземлені, а затвор з'єднаний зі стоком. Вважаймо, що  $U_{пор}=\text{const}$ . в). Зобразіть отриману характеристику графічно за вихідними даними і результатом, отриманим у п. а). г). Вичисліть опір  $R=1/S$  при  $U_3-U_{пор}=1$ В. д). Повторіть п. г) для випадку  $b/l=1$ .

6.3.21 а). МОН-транзистор з каналом *p*-типу має товщину оксидного шару  $x_{ок}=100$  нм і концентрацію домішок у підкладці  $N_d=10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Знайдіть порогову напругу, якщо  $\Phi_{ми}=-0,6$ В;  $Q_{SS}=5 \cdot 10^{11} e = 8 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>. б). Щоб знизити порогову напругу в транзисторі, розглянутому в п. а), використана іонна імплантація атомів бору. Яка повинна бути концентрація цих атомів, щоб порогова напруга стала дорівнювати  $-1,5$ В?

6.3.22 МОН-транзистор з каналом *n*-типу працює в режимі збіднення. Між витоком і землею включене джерело постійної напруги +5В. Відомо, що  $b=200$  мкм;  $l=10$  мкм;  $x_{ок}=0,1$  мкм;  $U_{пор}=-1$ В;  $U_3=0$ ;  $\epsilon_{ок}=4$ ;  $\mu_n=600$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>. Вичисліть струм витoku.

6.3.23 Виготовлений МОН-транзистор з каналом *n*-типу, який працює в режимі збагачення і має такі параметри:  $b=100$  мкм;  $l=10$  мкм;  $x_{ок}=0,1$  мкм;  $U_{пор}=+1$ В;  $\mu_n=450$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>. Знайдіть значення величини  $I_{с нас}$  і

$S_{\text{нас}}$ , якщо  $U_g = U_c = +5\text{В}$ , а підкладка та витік заземлені.

6.3.24 Виводи електронів польового транзистора помічені А, В, С. Опір між виводами В і С з обірваним виводом А дорівнює 300 Ом і не залежить від полярності прикладеної напруги. При напрузі  $-2\text{В}$ , прикладеній до А і В, тече струм  $10^{-11}\text{А}$ . Який електрод з'єднаний із затвором? Якого типу канал має цей транзистор?

6.3.25 Питома провідність каналу  $n$ -типу польового транзистора  $\gamma = 20,9\text{ См/м}$ , а його ширина  $b = 6\text{ мкм}$  при  $U_{3\text{В}} = 0$ . Знайти напругу відсічки  $U_{\text{ві.с}}$ . Враховуючи, що рухливість електронів  $\mu_n = 0,13\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , а відносна діелектрична проникність кремнію  $\epsilon = 12$ .

6.3.26 При  $U_{3\text{В}} = 0$  опір стік-витік польового транзистора  $R_{\text{СВ}} = 50\text{ Ом}$ . Визначити напругу  $U_{3\text{В}}$  при якій  $R_{\text{СВ}} = 200\text{ Ом}$ , якщо напруга відсічки  $U_{\text{ві.с}} = 6,8\text{В}$ . Вважати, що польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом працює при низькій напрузі стік-витік.

6.3.27 Питомий опір каналу  $p$ -типу  $\rho = 0,1\text{ Ом}\cdot\text{м}$  у польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом, а його ширина  $b = 6\text{ мкм}$  при  $U_{3\text{В}} = 0$ . Визначити напругу відсічки, якщо рухливість дірок  $\mu_p = 0,05\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  і відносна діелектрична проникність кремнію  $\epsilon = 12$ .

6.3.28 Питомий опір каналу  $p$ -типу польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом  $\rho = 0,1\text{ Ом}\cdot\text{м}$ , а половина ширини каналу  $a = 3\text{ мкм}$  при  $U_{3\text{В}} = 0$ . Визначити половину ширини каналу, якщо  $U_{3\text{В}} = U_{\text{ві.с}}/2$  і струм стока дорівнює нулю.

6.3.29 Крутизна польового транзистора  $S = 1\text{ мА/В}$  в області насичення при напрузі  $U_{3\text{В}} = -0,7\text{В}$  і  $U_{\text{СВ}} = 10$  з каналом  $n$ -типу і керуючим  $p$ - $n$  переходом. Визначити крутизну транзистора при  $U_{3\text{В}} = -1\text{В}$  і  $U_{\text{СВ}} = 10\text{В}$ , якщо напруга відсічки транзистора  $U_{\text{ві.с}} = +3\text{В}$ .

6.3.30 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом  $I_{\text{с макс}} = 1\text{ мА}$ ;  $U_{\text{ві.с}} = 4\text{В}$ . Визначити струм при зворотній напрузі  $U_{3\text{В}} = 2\text{В}$ .

6.3.31 Визначити крутизну і максимальну крутизну польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом при  $U_{3\text{В}} = 2\text{В}$ , коли  $I_{\text{с макс}} = 1\text{ мА}$ ;  $U_{\text{ві.с}} = 4\text{В}$ .



6.3.32 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом має  $I_{c\max}=2\text{mA}$ ;  $U_{\text{в.л.с.}}=5\text{В}$ . Визначити струм стока  $I_c$  транзистора при напругах затвора:  $-5\text{В}$ ;  $0$ ;  $-2,5\text{В}$ .

6.3.33 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом має  $I_{c\max}=2\text{mA}$ ;  $U_{\text{в.л.с.}}=5\text{В}$ . Визначити крутизну  $S$  транзистора при напругах затвора:  $-5\text{В}$ ;  $0$ ;  $-2,5\text{В}$ .

6.3.34 У МДН-транзисторі з каналом  $n$ -типу ширина затвора  $b=0,8\text{мм}$ , довжина каналу  $l=5\text{мкм}$ , товщина підзатворного ізолятора  $x_{\text{ок}}=150\text{нм}$ , рухливість електронів у каналі  $\mu_n=0,2\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , відносна діелектрична проникність оксидної плівки  $\epsilon=3,7$ , напруга стік-витік при насиченні  $U_{\text{св.н.}}=8\text{В}$ . Визначити крутизну в області насичення.

6.3.35 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу має  $I_c=2\text{mA}$  при  $U_j=0$  і напругу відсічки  $U_{\text{в.л.с.}}=5\text{В}$ . Визначити струм  $I_c$  при  $U_j=-5\text{В}$  і  $U_j=-2,5\text{В}$ .

6.3.36 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу має  $I_c=2\text{mA}$  при  $U_j=0$  і напругу відсічки  $U_{\text{в.л.с.}}=5\text{В}$ . Визначити крутизну стоко-затворної характеристики при напрузі на затворі  $-5\text{В}$ ;  $-2,5\text{В}$ ;  $0$ .

6.3.37 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу має параметри:  $N_a=10^{17}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{14}\text{см}^{-3}$ ; половина ширини каналу  $a=0,5\text{мкм}$ , а його довжина  $l=20\text{мкм}$  і ширина  $b=100\text{мкм}$ ; рухливість електронів  $\mu_n=1000\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Визначити:  $U_0$ ,  $U_{\text{в.л.с.}}$ .

6.3.38 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу має параметри:  $N_a=10^{17}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{14}\text{см}^{-3}$ ; половина товщини каналу  $a=0,5\text{мкм}$ , а його довжина  $l=20\text{мкм}$  і ширина  $b=100\text{мкм}$ ; рухливість електронів  $\mu_n=1000\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Визначити:  $R_0$ ,  $S$  і  $S_{\text{нас.}}$ . Положити, що  $U_j=U_{\text{в.л.с.}}/2$  і  $U_c=-U_{\text{в.л.с.}}/4$ .

6.3.39 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу має параметри:  $N_a=10^{19}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=10^{16}\text{см}^{-3}$ ; половина товщини каналу  $a=1\text{ мкм}$ , а його довжина  $l=20\text{мкм}$  і ширина  $b=100\text{мкм}$ ; рухливість носіїв  $\mu_n=1350\text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Визначити: напругу відсічки і струм насичення стоку

при  $U_3=0$ .

6.3.40 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $p$ -типу має такі параметри:  $N_d=N_a=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; половина товщини каналу  $a=5 \text{ мкм}$ ;  $b/l=25$ ;  $D_p=12,5 \text{ см}^2/\text{с}$ . Визначити: напругу затвору, при якій канал зникає незалежно від величини напруги  $U_c$ .

6.3.41 У польового транзистора з параметрами, указаними в задачі 6.3.40, визначити напругу відсічки при  $U_3=5\text{В}$ .

6.3.42 Польовий транзистор має параметри, що і в задачі 6.3.40. Визначити ефективну товщину каналу при  $2a_{\text{эф}}$ , при  $U_c=0$  і  $U_3=5\text{В}$ .

6.3.43 При таких же параметрах польового транзистора, як в задачі 6.3.40 і режимі, як в задачі 6.3.42, знайти опір каналу.

6.3.44 Польовий транзистор з керуючим  $p$ - $n$  переходом має  $I_{c \text{ макс}}=2 \text{ мА}$  і  $S_{\text{макс}}=2 \text{ мА/В}$  і включений у підсилювальний каскад за схемою з загальним витоком. Опір резистора навантаження  $R_H=10 \text{ кОм}$ . Визначити коефіцієнт підсилення за напругою, якщо а)  $U_{3\text{В}}=-1\text{В}$ ; б)  $U_{3\text{В}}=-0,5\text{В}$ ; в)  $U_{3\text{В}}=0\text{В}$ .

6.3.45 Польовий МОН-транзистор з каналом  $p$ -типу і алюмінієвим затвором має такі параметри:  $x_{\text{ок}}=100 \text{ нм}$ ;  $N_d=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $Q_{\text{SS}}=10^{11} \text{ е}^- = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;  $l=10 \text{ мкм}$ ;  $b=50 \text{ мкм}$ ;  $\mu_p=230 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . а). Знайдіть струм  $I_{c \text{ нас}}$  при  $U_3=-4\text{В}$  і  $-8\text{В}$ . Дайте зображення вольт-амперної характеристики  $I_c=f(U_c)$ . б). Вчисліть питому ємність  $C_0$  і граничну частоту  $f_{\text{гр}}=S/(2pC_0l \cdot b)$ , якщо  $U_F-U_{\text{пор}}=1\text{В}$ . Повторіть розрахунок, коли  $l=5 \text{ мкм}$ ;  $b=10 \text{ мкм}$ . Відомо, що  $\Phi_{\text{мо}}=3,2\text{В}$ ;  $\Phi_{\text{но}}=U_F+3,8$ ;  $\Phi_{\text{мн}}=3,2-(3,8+U_F)$ .

6.3.46 Відомо, що в тих випадках, коли напруга  $U_c$  переважає декілька десятих долів вольт, потенціал вздовж каналу польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$ -переходом розподілений за нелінійним законом. а) Виведіть вираз для розрахунку потенціалу  $0 \leq U(y) \leq U_c$  в різних точках каналу, вводячи безрозмірну величину  $y=x/l$ . б) Вважаючи, що  $U_3=0$ ;  $U_c=5\text{В}$ ;  $U_0=1\text{В}$ ;  $U_{\text{відс}}=-8\text{В}$ ; знайдіть значення параметра  $x/l$ , при яких  $U(x)=1, 2, 3$  і  $4\text{В}$ . Вка-

зівка: в рівнянні  $\int_0^l I_c dx = I_c \cdot l = 2q \cdot b \cdot \mu_n N_d a \int_0^{U_c} \left(1 - \frac{\hbar U}{a}\right) dU$  необхідно

провести заміну:  $l \rightarrow y$  і  $U_c = U(x)$ , розв'язати його відносно  $x$  і провести інтегрування.

# ТЕМА 7 ТОПОЛОГІЯ, СХЕМОТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

## 7.1 Вправи для самоперевірки

7.1.1 В кремнієву пластину, леговану атомами бору з концентрацією  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , дифундують миш'як. Процес ведуть при температурі  $1100^\circ\text{C}$  терміном 3 год. Коефіцієнт дифузії  $D = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ . а). Отримайте вираз, який описує кінцевий розподіл концентрації атомів миш'яку, якщо концентрація домішок на поверхні постійна:  $N_0 = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . б). Визначіть глибину, на якій виникає  $p$ - $n$ -перехід. Вказівка: тому що при температурі  $1100^\circ\text{C}$  значення  $n_i = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} > N_0$ , то профіль легування відповідає процесу "внутрішньої" дифузії (з необмеженого джерела). На основі властивостей додаткової функції помилок ( $erfc$ ) із рівності  $N(x, t)/N_0 = 2.5 \cdot 10^{-4}$  виходить, що  $x_{\text{пер}} / \left[ 2(Dt)^{1/2} \right] = 3$ .

7.1.2 Проводиться дифузійна обробка ділянки кремнію, на якій передбачається розмістити ІС. Для цього на поверхню епітаксialного шару  $n$ -типу з концентрацією донорів  $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , накладається акцепторна домішка з поверхневою густиною  $Q = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Зразок поміщають у дифузійну піч на 1 годину; коефіцієнт дифузії при температурі в цій печі  $D = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-3}$ . а). Покажіть, що функція  $x = f[N(x, t)]$ , яка описує профіль розподілу концентрації в глибину кристалу, має вигляд

$$x = 2,08 \cdot 10^{-4} \left[ \ln \frac{2,72 \cdot 10^{19}}{N(x, t)} \right]^2. \text{ б). Знайдіть значення } x_{\text{пер}} \text{ - глибину, на якій}$$

виникає перехід, тобто де концентрація донорів стає рівною концентрації дифундуючої домішки.

Вказівка: відомо, що якщо  $N_0/N_d = 2,72 \cdot 10^3$ , то  $\frac{x_{\text{пер}}}{2(Dt)^{1/2}} = 2,81$ .

7.1.3 а). Визначіть час, який необхідний для утворення на кремнієвій пластині оксидного шару товщиною 200нм при оксидуванні в атмосфері водяної пари, при температурі 900°C. Константи оксидування:  $A = 5,7 \cdot 10^{-1} \text{ мкм}$ ;  $B = 1,9 \cdot 10^{-1} \text{ мкм}^2 / \text{год}$ . Початковий час оксидування  $\tau = 0$ .

б). На кремнієвій пластині, розглянутій в п. а), витравлено вікно для дифузії бору. Потім пластина поміщена на 1,5 год. в атмосферу сухого кисню при температурі 1200°C. Визначіть товщину оксидного шару на вікні, якщо  $x_i = 20\text{нм}$ , а також товщину шару на поверхні попередньої пластини, якщо  $x_i = 200\text{нм}$ . Відомо, що при температурі 1200°C константи оксидування:  $A = 5 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ ;  $B = 4,2 \cdot 10^2 \text{ мкм}^2 / \text{год}$ .

7.1.4 Для виготовлення кремнієвого транзистора типу *n-p-n* використовується планарно-дифузійна технологія без прихованого шару. Які операції необхідно виконати в рамках даного технологічного циклу? Перечислити по крайній мірі п'ять послідовних етапів. Кремнієва пластина *p*-типу має товщину 0,127–0,152мм. і питомий опір 10 Ом·см. Товщина епітаксіального шару 50нм.

7.1.5 Вичисліть опір плівкового резистора і ємність конденсатора при таких умовах: а). Плівковий резистор являє собою кремнієву пластину товщиною 0,00254 см, рівномірно леговану фосфором з концентрацією  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  і бором з концентрацією  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Скористайтесь тим, що опір

плівки (Ом/ )  $R_s = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho l}{l x_i} = \frac{\rho}{x_i}$ , де  $\rho$  – питомий опір матеріалу;  $l$  – довжина.  $S$  – площа поперечного перерізу,  $x_i$  – товщина пластини. Вважайте,

що  $\mu_n = 1300 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . б). Конденсатор, утворений *p-n*-переходом. Концентрація акцепторів, яка дорівнює  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , значно менша концентрації донорів. Площа обкладок конденсатора  $S = 129 \text{ мм}^2$ . До конденсатора прикладена зворотна напруга 1,5В.

7.1.6 Розглядаються три схеми, що реалізують діоди на базі *n-p-n* транзистора: 1 – колектор з'єднаний з емітером, 2 – колектор з'єднаний з базою, 3 – база з'єднана з емітером. а). Отримайте формулу, яка описує

концентрацію надмірних носіїв при прямому зміщені в залежності від просторової координати. б). Знайдіть відповідний вираз для струму діода  $I_F$ . в). В якій схемі буде найменший прямий опір, якщо струм  $I_F$  заданий? г). Виясніть в якій схемі накопичений заряд буде найбільшим і яка схема характеризується найбільшою напругою пробою. д). Отримайте формулу зв'язку між величинами  $I_F$  та  $U_F$ , використовуючи модель Еберса-Молла.

7.1.7 Існує  $n$ -МОП-інвертор. Затвор верхнього транзистора з'єднаний не зі стоком, а з вихідним затискачем; між виходом і "землею" включений конденсатор  $C_n$  ємністю 0,05 пФ. Вчисліть час зарядки і розрядки цього конденсатора в тому випадку, коли вхідна напруга стрибкоподібно змінюється від 0 до 5В і навпаки.

Вихідні дані:

$$U_{ж} = +5В; \quad U_{пор1} = +0,7В; \quad U_{пор2} = -1,5В; \quad x_{ок} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ см};$$

$$C_0 = 5,9 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi}{\text{см}^2}; \quad \mu_n = 700 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}; \quad \frac{b_1}{l_1} = 3; \quad \frac{b_2}{l_2} = \frac{1}{4}.$$

Спрощувальні передумови: а) транзистор  $VT_2$  насичений протягом часу зарядки, а транзистор  $VT_1$  - протягом всього часу розрядки; б) тривалість перехідних процесів у транзисторах досить мала.

7.1.8 У запам'ятовувальному пристрою з плаваючим затвором нижній ізолювальний шар має товщину  $x_1 = 10$  нм і відносну діелектричну проникність  $\epsilon_1 = 4$ ; параметри верхнього шару:  $x_2 = 100$  нм;  $\epsilon_2 = 10$ . Густина струму в нижньому шарі  $J = \gamma E$ , де  $\gamma = 10^{-7} \text{ См/см}$ ; у верхньому шарі густина струму дуже мала. Вчисліть зміну порогової напруги  $\Delta U_{пор}$  для даного приладу, вважаючи, що до затвора прикладена напруга 10В. Розгляньте такі випадки: а)  $t = 0,25$  мкс; б)  $t \rightarrow \infty$ , тобто час достатньо великий, так що густина струму  $J \rightarrow 0$ .

7.1.9 Для виготовлення КМОП-приладу використана кремнієва підкладка з помірною концентрацією легуючих домішок ( $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ); область  $p$ -типу утворена шляхом імплантації атомів бору, які проникають в підкладку через оксидний шар товщиною 60нм. Енергія атомів 50кеВ, доза імплантації  $\Phi = 10^3 \text{ см}^{-2}$ . Вслід за імплантацією проводять дифузію при тем-

пературі 1200°C протягом 6 год. Вважаючи, що  $SiO_2$  і  $Si$  однаково взаємодіють з іонами і що густиною іонного потоку, який уловлюється шаром  $SiO_2$ , можна знехтувати, визначити: а) максимальну концентрацію; б) глибину  $p$ -області; концентрацію атомів бору  $[N_{(x=0)}]$  в кремнії після проведення дифузії. Вихідні дані: розрахункова глибина проникнення іонів в матеріал  $R_p=160\text{нм}$ , середнє квадратичне відхилення (внаслідок дії різних факторів)  $\Delta R_p=50\text{нм}$ ,  $D=2,75 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ . Вказівки:

$$N_{\text{max}} = \frac{\Phi}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_p};$$

$$N_{(x,t)} = \frac{\Phi}{(\pi Dt)^{1/2}} \exp\left\{-\left[\frac{x}{2(Dt)^{1/2}}\right]^2\right\}$$

7.1.10 Прилад із зарядовим зв'язком утворений на підкладці  $p$ -типу з концентрацією домішок  $N_d=1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Товщина оксидного шару  $x_{\text{ок}}=150\text{нм}$ , електрони мають прямокутну форму розмірами  $10 \times 20 \text{ мкм}$ . а). Визначіть потенціал на поверхні та глибину збідненого шару, що відповідає двом електродам, які перебувають під напругами 10 і 20В відповідно. Вважайте, що напруга плоских зон  $U_{\text{пз}} = 0$  і заряд, обумовлений сигналом,  $Q_c=0$ . б). Повторіть розрахунок п. а), вважаючи, що в комірку ПЗЗ введено  $10^{16}$  електронів. Вихідні дані:  $\epsilon_r \epsilon_0 = 1,04 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см}$ ;  $\epsilon_{\text{ок}} \epsilon_0 = 3,4 \cdot 10^{-13} \text{ Ф/см}$ .

Вказівка:

$$U_s = U - B \left[ \left( 1 + 2U/B \right)^{1/2} - 1 \right],$$

$$\text{де } U = U_3 - U_{\text{пз}} - \frac{Q_{\text{SS}}}{C_0}; B = \frac{\epsilon_H \epsilon_0 N_a}{C_0^2}.$$

## 7.2 Розв'язування

7.2.1 а). Тому, що при температурі  $1100^{\circ}\text{C}$  концентрація  $n_i = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , то при легуванні поверхні домішкою з концентрацією  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  профіль розподілення домішок відповідає процесу "внутрішньої" дифузії:

$$N_{(x,t)} = N_0 \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right].$$

Тут

$$N_0 = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}; t = 3\tau = 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ с}; D = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}; (Dt)^{1/2} = 2,32 \cdot 10^{-5}.$$

$$\text{Тоді } N_{(x,t)} = 4 \cdot 10^{18} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{4,64 \cdot 10^{-5}} \right].$$

б). Глибину переходу визначасмо з рівняння

$$10^{15} = 4 \cdot 10^{18} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x_{\text{пер}}}{4,64 \cdot 10^{-5}} \right].$$

Згідно з умовою  $\frac{x_{\text{пер}}}{4,64 \cdot 10^{-5}} = 3$ , звідки  $x_{\text{пер}} = 1,39 \text{ мкм}$ .

7.2.2 а). При дифузії атомів бору за гаусівським законом

$$N_{(x,t)} = N_0 \exp \left( -\frac{x^2}{4Dt} \right)$$

Значить,

$$N_0 = \frac{Q}{(\pi Dt)^{1/2}} = 2,72 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3};$$

$$x = 2(Dt)^{1/2} \left[ \ln \frac{N_0}{N_{(x,t)}} \right]^{1/2} = 2,08 \cdot 10^{-4} \left[ \ln \frac{2,72 \cdot 10^{19}}{N_{(x,t)}} \right]^{1/2}$$

б) тут  $N_d = N_0 \exp \left( -\frac{x^2}{4Dt} \right)$ . Якщо  $x_{\text{пер}}$  - глибина переходу, то

$$\exp \left( -\frac{x_{\text{пер}}^2}{4Dt} \right) = \frac{N_0}{N_d} = \frac{2,72 \cdot 10^{19}}{10^{16}} = 2,72 \cdot 10^3.$$



звідки  $\frac{x_{\text{пер}}}{4Dt} = \ln(2,72 \cdot 10^3) = 7,91$ ;

$$\frac{x_{\text{пер}}}{9(Dt)^{1/2}} = 2,81; x_{\text{пер}} = 2 \cdot 2,81(Dt)^{1/2} = 5,85 \text{ мкм.}$$

7.2.3 а)

$$x_{\text{ок}} = \frac{A}{2} \left\{ \left[ 1 + \frac{t + \tau}{A^2 (4B)} \right]^2 - 1 \right\};$$

$$2000 \cdot 10^{-4} = \frac{5,7 \cdot 10^{-4}}{2} \left\{ \left[ 1 + \frac{4 \cdot 0,19t}{0,57} \right]^2 - 1 \right\};$$

$$t = 48,6 \text{ хв.}$$

б). Знаходимо товщину оксидного шару на вікні з початковою товщиною  $x_i = 20 \text{ нм}$ :

$$\tau = \frac{x_i^2 + Ax_i}{B} = \frac{(0,02)^2 + 0,05 \cdot 0,02}{4,2 \cdot 10^{-2}} = 3,33 \cdot 10^{-2} \text{ год};$$

$$x_{\text{ок}} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{2} \left\{ \left[ 1 + \frac{(1,5 + 3,33 \cdot 10^{-2}) \cdot 4 \cdot 0,042}{(5 \cdot 10^{-2})^2} \right]^2 - 1 \right\} = 230 \text{ нм.}$$

Знаходимо товщину шару оксиду на попередній плівці при  $x_i = 200 \text{ нм}$ :

$$\tau = \frac{(0,2)^2 + 0,05 \cdot 0,2}{4,2 \cdot 10^{-2}} = 1,19 \text{ год};$$

$$x_{\text{ок}} = 312 \text{ нм.}$$

7.2.4 1). Вихідний стан.

2). Епітаксіальне нарощування шару  $n$ -типу з питомим опором  $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  товщиною  $0,254 \text{ нм}$ :

3). Нарощування шару  $\text{SiO}_2$  товщиною  $500 \text{ нм}$  на епітаксіальний шар.

4). Накладка фоторезисту, маскування і витравлення вікон в шарі.

5). Легування акцепторною домішкою шляхом дифузії атомів бору.

6). Нарощування шару  $\text{SiO}_2$ .

7). Повторення операції 4 для підготування базової області.

8). Дифузія бору в базову область.

9). Нарощування шару  $\text{SiO}_2$ .

10). Повторення операції 4 для підготування областей емітера і колектора.

11). Дифузія донорної домішки.

12). Нарощування шару  $\text{SiO}_2$ .

13). Повторення операції 4 для утворення вікон під контактні площадки.

14). Металізація всієї поверхні вакуумним розпиленням алюмінію.

15). Повторення операції 4 для утворення між'єднань. Видалення лишків алюмінієвого шару.

16). Контроль функціонування.

17). Вміщення у корпус.

18). Вихідний контроль.

7.2.5 а)

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{(N_d - N_a) e \cdot \mu_n} = \frac{1}{(10^{17} - 5 \cdot 10^{16}) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1300} = 0,0960 \text{ м} \cdot \text{см};$$

$$R_s = \frac{\rho}{x_i} = \frac{0,096}{2,54 \cdot 10^{-3}} = 37,8 \text{ Ом} / \square$$

$$\delta) W = \left( \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_H U}{e N_a} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot 8,849 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 1,5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}} \right)^2 = 4,46 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_H S}{W} = \frac{1,06 \cdot 10^{-10} \cdot 129 \cdot 10^{-6}}{4,46 \cdot 10^{-4}} = 3,07 \text{ пФ}.$$

7.2.6 а). Для кожної схеми концентрація носіїв у базі визначається за формулою:

$$P'_n(x) = P_n \left[ \exp\left(\frac{U_{EE}}{U_T}\right) - 1 \right] \cdot \left[ \text{sh}\left(\frac{W-x}{L_p}\right) / \text{sh}\left(\frac{W}{L_p}\right) \right] + \\ + P_n \left[ \exp\left(\frac{U_{KB}}{U_T}\right) - 1 \right] \cdot \left[ \text{sh}\left(\frac{x}{L}\right) / \text{sh}\left(\frac{W}{L_p}\right) \right].$$

б). В схемі 1.

$$I_F = P'_{nE} \frac{eSD_{pE}}{L_{pE}} + n'_{nk} \frac{eSD_{pK}}{L_{pK}} = eSn_i^2 \left( \frac{D_{pE}}{Nd_1 L_{pE}} + \frac{D_{pK}}{Nd_2 L_{pK}} \right) \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_F}{U_T}\right) - 1 \right].$$

В схемі 2.

$$I_F = P'_{nE} \frac{eSD_{pE}}{L_{pE}} + n'_{pB} \frac{eSD_{pB}}{W_B} = eSn_i^2 \left( \frac{D_{pE}}{Nd_1 L_{pE}} + \frac{D_{nB}}{W_B N_a} \right) \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_F}{U_T}\right) - 1 \right].$$

В схемі 3.

$$I_F = n'_{pB} \frac{qSD_{nB}}{W_B} + P'_{nK} \frac{qSD_{pK}}{L_{pK}} = qSn_i^2 \left( \frac{D_{nB}}{W_B N_a} + \frac{D_{pK}}{Nd_2 L_{pK}} \right) \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_F}{U_T}\right) - 1 \right].$$

в). В схемі 2 струм  $I_B$  дуже малий, тому що тут транзистор працює в активному режимі, і напруга на переході база – емітер мала.

г). Всі три рівняння для струму  $I_F$ , які отримані в п. б) мають співмножники однакового виду. Якщо вважати, що  $D_{nB} \cdot D_{pK} \cdot D_{pE}$  і  $L_{pK} \cdot L_{pE}$ , то для розрахунку відносних концентрацій неосновних носіїв у базі для кожного випадку можна використовувати приблизні вирази, які стоять у дужках, і отримати

$$\frac{P'_{nE}(cx2)}{n'_{pK}(cx5)} = \frac{Nd_2}{Nd_1} \ll 1; \quad \frac{n'_{0B}(cx2)}{n'_{pB}(cx5)} = 1.$$

Як наслідок, загальний накопичений заряд в схемі 2 виходить суттєво меншим, ніж в схемі 1 і 3. Напруга пробою  $U_{прб}$  в схемі 3 найбільша, тому що тут під напругою буде перехід база-колектор в схемах 1 і 2 напруга прикладена до переходу база-емітер.

д). У відповідності з рівнянням Еберса-Молла.

$$I_K = -\alpha_F I_{E0} (e^{U_{K0}/U_T} - 1) + I_{K0} (e^{U_{KB}/U_T} - 1)$$

В схемі 1.

$$I = [I_{E0}(\varphi - \alpha_F) I_{K0}(\varphi - \alpha_R)] (e^{U_{K0}/U_T} - 1) = I_{K0} \left( 1 - 2\alpha_R + \frac{\alpha_R}{\alpha_F} \right) (e^{U_{K0}/U_T} - 1).$$

Де використана рівність  $\alpha_F I_{E0} = \alpha_R I_{K0}$

В схемі 2 напруга  $U_{KB} = 0$ ; тому

$$I = I_{E0} (e^{U_{EB} U_T} - 1) = I_{K0} \frac{\alpha_R}{\alpha_F} (e^{U_{EK} U_T} - 1)$$

В схемі 3 напруга  $U_{EB}=0$ ,  $U_{KB}=U$ , тому  $I = I_K = I_{KB} (e^{U U_T} - 1)$ .

Тому, що  $\alpha_R < \alpha_F < 1$ , то струм в схемі 1 при одній і тій же напрузі  $U$  буде найбільшим, однак, якщо  $\alpha_F \approx 1$ , то в схемі 3 струм буде практично таким же.

7.2.7

$$\beta_2 = \frac{b_2}{I_2} \mu_n C_0 = \frac{1}{4} \cdot 700 \cdot 5,9 \cdot 10^{-8} = 10,325 \text{ мкА} / \text{В}^2;$$

$$\beta_1 = \frac{b_1}{I_1} \mu_n C_0 = 3 \cdot 700 \cdot 5,9 \cdot 10^{-8} = 123,9 \text{ мкА} / \text{В}^2;$$

$$I_c (VT_2 \text{ насичений}) = \frac{1}{2} \beta_2 (U_3 - U_{\text{пор}2})^2 = 11,62 \text{ мкА};$$

$$I_c (VT_1 \text{ насичений}) = \frac{1}{2} \beta_1 (U_3 - U_{\text{пор}1})^2 = 0,5 \cdot 123,9 (5 - 0,7)^2 = 1,145 \text{ мкА};$$

Тому, що транзистор  $VT_1$ , за міркуванням, працює в насиченому режимі під час розрядки, то

$$t_{\text{роз}} = \frac{Q_H}{I_c} = \frac{2,5 \cdot 10^{-13}}{1,145 \cdot 10^{-3}} = 0,218 \text{ нс}$$

Транзистор  $VT_2$  насичений під час зарядки, що визначається граничними точками  $U_{\text{вих}}=0$  і  $U_{\text{вих}}=5\text{В}$ , тому

$$t_{\text{зар}} = \frac{Q_H}{I_c} = \frac{2,5 \cdot 10^{-13}}{11,62 \cdot 10^{-6}} = 21,51 \text{ нс}.$$

7.2.8 Якщо до затвора приладу прикласти напругу  $U_3 > 0$ , то в шарах товщиною  $x_1$  і  $x_2$  виникають електричні поля, напруженості яких зв'язані між собою законом Гаусса:

$$\epsilon_0 \epsilon_1 E_1 = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2 + Q,$$

де  $Q$  – заряд накопичений у плаваючому затворі. Крім того  $U_3 = E_1 x_1 + E_2 x_2$ .

Тому

$$E_1 = \frac{U_3}{x_1 + x_2 (\epsilon_1 / \epsilon_2)} + \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_1 + \epsilon_0 \epsilon_2 (x_1 / x_2)};$$

$$J = \gamma E_1 = 10^{-7} \left[ \frac{10}{100 \cdot 10^{-8} + 100 \cdot 10^{-8} \left( \frac{4}{10} \right)} + \frac{Q}{4\epsilon_0 + 10\epsilon_0 \left( \frac{100}{1000} \right)} \right] =$$

$$= 0,2 - 2,26 \cdot 10^5 |Q|.$$

а). Якщо накопичений заряд не знижує суттєво напруженість поля  $E$ , тобто у випадку, коли  $0,2 \gg 2,26 \cdot 10^5 |Q|$ ,

$$Q = \int_0^t \gamma E_1 dt' \approx 0,2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл};$$

$$\Delta U_{\text{пор}} = Q/C_2 = \frac{5 \cdot 10^{-8}}{10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} (1000 \cdot 10^{-8})} = 0,565 \text{ В}.$$

б). Якщо  $t \rightarrow \infty$ ,  $J \rightarrow 0$ , то

$$|Q| \approx 0,2 / (2,26 \cdot 10^5) \approx 8,84 \cdot 10^{-7} \text{ Кл};$$

$$U_{\text{пор}} = \frac{Q}{C_2} = \frac{8,84 \cdot 10^{-7}}{10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{-5}} = 9,98 \text{ В}.$$

7.2.9 а). Максимальна концентрація

$$N_{\text{max}} = \frac{\Phi}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_p} = \frac{10^{13}}{(2\pi)^{1/2} 500 \cdot 10^{-8}} = 7,98 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

$$\delta) N_{(x,t)} = \frac{\Phi}{(\pi Dt)^{1/2}} \exp \left\{ - \left[ \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right]^2 \right\};$$

$$10^{17} = \frac{10^{13}}{[\pi 2,75 \cdot 10^{-12} \cdot 2,16 \cdot 10^4]^{1/2}} \exp \left\{ - \left[ \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right]^2 \right\};$$

$$\exp \left\{ - \left[ \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right]^2 \right\} = 4,33 \cdot 10^{-2}$$

$$\left[ \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right]^2 = 3,14; \quad \frac{x}{2(Dt)^{1/2}} = 1,772;$$

$$x = 2 \cdot 1,772 (2,75 \cdot 10^{-12} \cdot 2,16 \cdot 10^4)^{1/2} = 8,64 \text{ мкм}.$$

$$\text{в) } N_{(x=0)} = \frac{\Phi}{(\pi Dt)^{1/2}} = 2,31 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

## 7.2.10

$$a) C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_n}{x_{ок}} = 2,27 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$B = e \epsilon_0 \epsilon_n N_a / C_0 = 0,0646 \text{ В};$$

$$U_{S1} = U_{3(10)} - B \left[ \left( 1 + \frac{2U_{3(10)}}{B} \right)^{1/2} - 1 \right] = 8,93 \text{ В};$$

$$x_{d1} = \left( \frac{2\epsilon_0 \epsilon_n U_{S1}}{e N_a} \right)^{1/2} = 7,62 \text{ мкм};$$

$$U_{S2} = U_{3(10)} - B \left[ \left( 1 + \frac{2U_{3(20)}}{B} \right)^{1/2} - 1 \right] = 18,46 \text{ В};$$

$$x_{d2} = 10,95 \text{ мкм}.$$

б). Уявимо, що  $10^{16}$  електронів вводиться у другий електрод; при цьому

$$Q_{SS} = \frac{ne}{S} = \frac{10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2;$$

$$U_2' = U_{32} - U_{ПЗ} - Q_{SS} / C_0 = 20 - 8 \cdot 10^{-8} (2,27 \cdot 10^{-8}) = 16,48 \text{ В};$$

$$U_{S2}' = U_2' - B \left[ \left( 1 + \frac{2U_2'}{B} \right)^{1/2} - 1 \right] = 15,08 \text{ В}.$$

Можна бачити, що  $U_{S2}' > U_{S1}$ . Тому  $10^{16}$  електронів залишаються в околі другого електрода.

$$x_{d2}' = \left[ \frac{2\epsilon_0 \epsilon_n U_{S2}'}{e N_a} \right]^{1/2} = 9,9 \text{ мкм}.$$

### 7.3 Задачі

7.3.1 Проводиться дифузія крізь епітаксiальний шар товщиною 10 мкм, в результаті якої повинна забезпечуватися концентрація донорів  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Концентрація дифундованої речовини на поверхні складає

$5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  і підтримується постійною в ході процесу. Вичисліть тривалість операції при температурі в печі  $1200^\circ\text{C}$ , якщо коефіцієнт дифузії  $D=3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ .

Вказівка: з таблиць функції *erfc* відомо, що при  $\frac{N_{(x,t)}}{N_0} = 2 \cdot 10^{-4}$  значення  $10^{-3} / [2(Dt)]^{1/2} = 2,65$ .

7.3.2 Кремнієва підкладка легована атомами бору з концентрацією  $N_0=1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На поверхню підкладки нанесений миш'як з концентрацією  $N_d=1,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . Процес ведуть тривалістю 20 хвилин при температурі  $1200^\circ\text{C}$ , коефіцієнт дифузії  $D=2,46 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ . Визначити глибину переходу  $x_{\text{пер}}$ .

Вказівка: при  $N_d/N_0=10^4$ , використовуючи функцію *erfc*, маємо рівність  $\frac{x_{\text{пер}}}{2(Dt)^{1/2}} = 2,73$ .

7.3.3 На кремнієвій підкладці *p*-типу створений епітаксіальний шар *n*-типу товщиною 10мкм з концентрацією  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для ізоляції *n*-шару проводять дифузію бору при температурі  $1200^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт дифузії  $D=2,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ; концентрація бору на поверхні постійна і складає  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . а). Яка повинна бути тривалість даного процесу? При відповіді використайте те, що рівняння  $\text{erfc}(z)=10^{-4}$  має корінь  $z=2,75$ . б). На яку глибину продифундуються атоми сурми, що утворюють прихований домішковий шар, в дану епітаксіальну плівку за визначений в п. а) час? Коефіцієнт дифузії  $D=2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ; незмінна концентрація домішки на межі системи підкладинка-епітаксіальний шар дорівнює  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

7.3.4 Епітаксіальний шар товщиною 10мкм рівномірно легований донорною домішкою з концентрацією  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Щоб ізолювати цей шар, проводять дифузію атомів бору, які нанесені на поверхню з концентрацією  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Процес триває 10 годин, під час якого концентрація домішки на поверхні підтримується постійною. Вичисліть температуру, яку необхідно створити в печі.

Вказівка: відомо, що якщо  $N_d/N_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ , то  $\frac{x_{\text{пер}}}{2(Dt)^{1/2}} = 2,47$ ; коефі-

цієнт дифузії  $D = 1,138 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$  одержимо при  $1000/T = 0,7$ .

7.3.5 Базова область біполярного транзистора сформована двоетапною дифузією бору, яка забезпечує гаусівський профіль розподілу домішок. Відомо, що на поверхні концентрація домішки  $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , глибина емітерного переходу 1,3 мкм, глибина колекторного переходу 2 мкм, концентрація домішки в епітаксialьному колекторному шарі  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Получіть вираз, який описує розподіл концентрації легуючої домішки в базі.

7.3.6 Знайдіть час, який необхідний для нанесення оксидного шару товщиною 450 нм при температурі  $1050^\circ\text{C}$ . На поверхню пластини з кремнію  $p$ -типу питомим опором  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Процес оксидування вологий і характеризується параметрами  $A = 0,31 \text{ мкм}$ ;  $B = 0,47 \text{ мкм}^2/\text{год}$ .

7.3.7 Поверхня кремнієвої пластини вкрита оксидним шаром товщиною 100 нм. Вчисліть час, який необхідний для створення додаткового шару оксиду в атмосфері сухого кисню при температурі  $1200^\circ\text{C}$ . Кінцева товщина шару  $x_{\text{ок}} = 0,18 \text{ мкм}$  достатня для маскування дифузії бору, що проводиться за 100 хвилин при температурі  $1100^\circ\text{C}$ . Константи оксидування при температурі  $1200^\circ\text{C}$   $A = 5 \cdot 10^2 \text{ мкм}$ ;  $B = 4,2 \cdot 10^2 \text{ мкм}^2/\text{год}$ .

7.3.8 Найдіть час, за який формується оксидна плівка товщиною 2 мкм на поверхні кремнієвої підкладки при температурі  $960^\circ\text{C}$  і тиску пари 25 атм ( $2,45 \text{ МПа}$ ). Константи оксидування при таких умовах:  $A = 0,50 \text{ мкм}$ ;  $B = 5,0 \text{ мкм}^2/\text{год}$ .

7.3.9 Горизонтальний  $n^+$ - $p$ -перехід створений шляхом дифузії фосфору в кремнієву підкладку  $p$ -типу. Потім перехід піддано сухому оксидуванню при температурі  $900^\circ\text{C}$  терміном 5 год. Відомо, що початкова товщина оксидної плівки перед сухим оксидуванням над  $n^+$ -складає 2 мкм, а над  $p$ -областю – на  $0,054 \text{ мкм}$  більше. При заданих умовах константи оксидування мають значення  $A = 2,25 \cdot 10^2 \text{ мкм}$ ;  $B = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2/\text{год}$ . Вчисліть різницю товщин оксидних шарів над  $n^+$ - і  $p$ -областями.



7.3.10 Плівковий резистор ІС створений дифузією атомів фосфору в епітаксіальний шар  $p$ -типу, легований з концентрацією  $N_a=10^{17}\text{см}^{-3}$ . Вийшло так, що після перерозподілу домішок при температурі  $1000^\circ\text{C}$  глибина  $p$ - $n$ -переходу  $x_{\text{пер}}=2,5\text{мкм}$ . Вичисліть поверхневий опір шару плівки ( $\text{Ом}/$ ), отриманий в процесі дифузії, якщо відповідна питома провідність  $\gamma=1.5\cdot 10^3\text{см}\cdot\text{см}^{-1}$ . Знайдіть довжину резистора опором  $2\text{кОм}$ , якщо його мінімальна ширина має  $6,1\cdot 10^{-3}\text{мкм}$ .

7.3.11 Відносна діелектрична проникність матеріалів  $\text{SiO}_2$  і  $\text{SiN}_4$  дорівнює  $3,9$  і  $7,5$  відповідно. Вичисліть для кожного випадку питому ємність ( $\text{Ф}/\text{см}^2$ ) шару матеріалу товщиною  $0,1\text{мкм}$ .

7.3.12 На кремнієвій підкладці  $p$ -типу з параметрами  $\rho=200\text{Ом}\cdot\text{см}$ ;  $\mu_p=500\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  створена ізольована епітаксіальна область  $n$ -типу, яка має питомий опір  $0,2\text{Ом}\cdot\text{см}$ , довжину  $0,254\text{мм}$ , ширину  $0,127\text{мм}$  і товщину  $0,0254\text{мм}$ . Знайдіть паразитну ємність між  $n$ -областю і підкладкою  $p$ -типу, якщо до області прикладено зворотну напругу  $5\text{В}$ . Ємність складається з ємності  $C_1$  між областю і підкладкою, а також ємності  $C_2$ , яка обумовлена бічними участками, причому питома ємність складає  $0,1\text{пФ}/0,000645\text{мм}^2$ .

7.3.13 В інтегральній схемі сформований МОН-конденсатор з товщиною оксидного шару  $50\text{нм}$ . Знайдіть площу, яку цей конденсатор займає на кристалі, якщо його ємність  $200\text{пФ}$ . Вважайте, що  $\epsilon_{\text{ок}}=3,5$ .

7.3.14 Складіть список не менше  $15$  операцій, починаючи з нанесення шару  $\text{SiO}_2$  і закінчуючи металізацією алюмінієм, які входять у технологічний цикл виробництва епітаксіального транзистора з подвійною дифузією і з прихованим шаром.

7.3.15 Визначіть кількість фотошаблонів і мету їх використання, необхідних для створення  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторів інтегральних схем при одному шарі внутрішньо-схемних з'єднань за технологією: а) епітаксіально-планарною; б) ізопланарною.

7.3.16 Які параметри епітаксіально-планарного транзистора ІС з прихованим шаром зміняться, якщо: а) зменшити горизонтальні розміри

прихованого  $n^+$ -шару; б) зменшити концентрацію домішок в цьому шарі; в) збільшити горизонтальні розміри цього шару так, щоб він досягав ізолювальних  $p^+$ -областей; г) використовувати фосфор, як легуючу домішку в цьому шарі?

7.3.17 Які параметри ізопланарного  $n$ - $p$ - $n$  транзистора ІС зміняться, якщо: а) при незмінній товщині бази зменшити товщину епітаксiального шару настiльки, що база буде межувати з прихованим  $n^+$ -переходом; б) збільшити енергію іонів при легуванні бази; в) зменшити дозу легування бази?

7.3.18 В скільки разів зміниться надмірний заряд дірок в колекторі  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора при використанні у його структурі переходу Шоттки між колектором і базою, якщо різниця падіння напруг на колекторі по відношенню до аналогічного транзистора без цього переходу  $U=260$ мВ при температурі  $T=120^\circ\text{C}$ ?

7.3.19 а). Нарисуйте принципові схеми п'яти основних варіантів реалізації діода на основі  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора: колектор з'єднаний з базою, колектор з'єднаний з емітером, колектор вільний, емітер з'єднаний з базою, емітер вільний. б). Виясніть, у якій з цих схем найменше падіння напруги при прямому зміщенні? в). У якій з схем напруга пробоя найбільша? г). У яких схемах найбільші і найменші зворотні струми?

7.3.20 Якщо не виконати відповідних заходів, то при виникненні контакту алюмінію з кремнієм в колекторній області  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора утворюється не омичний контакт, а діод Шоттки. Поясніть, яку технологічну операцію необхідно провести, щоб на межі розділення  $Al$ - $Si$  утворився омичний контакт.

7.3.21 Поясніть, чому транзистору  $p$ - $n$ - $p$  з горизонтальною структурою притаманні низькі значення параметра  $\beta$ ?

7.3.22 На деякій підкладці (II) створений транзистор  $VT_1$  типу  $n$ - $p$ - $n$ . а) Зарисуйте, яким чином між чотирма виводами Е, Б, К і П розташовуються транзистор  $VT_1$  разом з транзистором  $VT_2$  типу  $p$ - $n$ - $p$ . б) використовуючи рисунок, поясніть в якому режимі працює транзистор  $VT_2$ , якщо

транзистор  $VT_1$  перебуває: 1) в активному режимі; 2) в режимі відсічки; 3) в режимі насичення.

7.3.23 Часто в ІС використовують багатомітерні біполярні транзистори типу  $n-p-n$ . а) У чому причина їх широкого використання? б) Як зміниться інверсний коефіцієнт передачі багатомітерного транзистора при зменшенні струму бази?

7.3.24 Знайдіть опір і паразитну ємність резистора, створеного в базовому шарі біполярного  $n-p-n$ -транзистора товщиною 0,2 мкм, довжиною  $l=100\text{мкм}$  і шириною  $b=5\text{мкм}$ ,  $N_a=10^{13}\text{см}^{-3}$ ;  $\mu_p=300\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Концентрація донорів у епітаксialьному шарі  $N_d=10^{16}\text{см}^{-3}$ , напруга на кінцях резистора відносно підкладки  $U_1=1\text{В}$ ,  $U_2=4\text{В}$ ,  $U_{II}=5\text{В}$ . Ємністю і опором крайових (контактних) областей можна знехтувати. Вказівка: для розрахунку паразитної ємності використайте формулу для бар'єрної ємності плоского  $p-n$ -переходу із ступінчастим розподілом домішок.

7.3.25 Знайдіть максимальну ємність тонкоплівкового конденсатора з діелектриком із  $\text{SiO}_2$  і розмірами верхньої обкладки  $100\times 100\text{мкм}$  при напрузі пробією 30В, відносна діелектрична проникність монооксиду кремнію  $\epsilon_3=5$ .

7.3.26 Затвор польового транзистора типу  $p$ -МОН, який працює в режимі збагачення, з'єднаний зі стоком. а) Зарисуйте відповідну принципову схему. б) Знайдіть вид функції  $I_c=f(U_c)$ .

7.3.27 Рівняння  $n$ -МОН-транзистора, який працює в триодному (лінійному) режимі, має вигляд

$$I_c = k[2(U_3 - U_{\text{пор}})U_c - U_c^2] \text{ при } 0 \leq U_c \leq U_3 - U_{\text{пор}}.$$

Відповідні рівняння для режиму насичення:

$$I_{c\text{нас}} = k(U_c - U_{\text{пор}})^2 \text{ при } 0 \leq U_3 - U_{\text{пор}} < U_c;$$

постійний коефіцієнт  $k = \mu_n \epsilon_a \epsilon_{\text{ок}} Z / (2x_{\text{ок}} L)$ .

Дайте зображення вихідної характеристики  $I_c=f(U_c)$  для даного транзистора при  $U_3=2,3$  і 4В. Відомо, що  $k=1\text{мА/В}^2$ ;  $U_{\text{пор}}=2\text{В}$ .

7.3.28 Масмо  $n$ -МОН-транзистор, який працює в режимі збагачення.

а). Визначіть, чому дорівнює напруга  $U_C$ , якщо затвор з'єднаний із стоком і крім того,  $I_C \approx 0$ . б). Поясніть, чому при  $U_{3C}=0$  прилад насичений незалежно від значення струму  $I_C$ .

7.3.29 Нарисуйте в одній системі координат залежності напруг пробою і замикання від глибини залягання  $p$ - $n$ -переходів в структурі  $n$ -каналного транзистора (рис. 7.1).

7.3.30 Яка різниця значень питомої крутизни і часу прольоту каналу комплементарних транзисторів з однаковими розмірами в структурі (рис. 7.2).

7.3.31 Які електричні параметри МДН-транзистора (див. рис. 7.1) і як зміняться, якщо затвор легувати не донорами, а акцепторами?

7.3.32 Визначіть розкид порогової напруги МДН-транзистора при  $\Phi_{M.H.}=0,8V$ ,  $N_{d,k}=10^{17} \text{ см}^{-3}$ , якщо товщина каналу  $d_{\sigma}=0,2 \text{ мкм} \pm 10\%$ .

7.3.33 Скільки фотошаблонів і для яких цілей необхідно при створенні МДН-транзистора (див. рис. 7.3)?

7.3.34 Які параметри найпростішого елемента ТТЛ (див. рис. 7.7) і як змінюються при: а) підвищеній напрузі  $U_{Ж}$ ; б) підвищенні температури; в) збільшенні опору  $R_1$  (при незмінних  $R_2$  і  $U_{Ж}$ ); г) заміні епітаксiallyно-планарних транзисторів на ізопланарні; д) вилученні в структурі багатосмітерного транзистора (див. рис. 7.4) участок вузької пасивної бази або шару металізації, що розташований посередені базової області; е) легуванні кристалу атомами золота?

7.3.35 Визначіть: а) вхідні струми найпростішого елемента ТТЛ (див. рис. 7.5) при  $U_{Ж}=2,5V$ ,  $U'_{BE}=U'_{KE}=0,7V [T=25^{\circ}C]$ ,  $R_1=2 \text{ кОм}$ ,  $\beta_{II}=0,05$  при  $U_{вх}=0,2V$  і  $U_{вх}=2,2V$ ; б) як змінюються ці струми при підвищенні температури до  $125^{\circ}C$  ( $\beta_{II}=0,07$ ), якщо використовуються напівпровідникові резистори на основі базового шару?

7.3.36 Для створення  $n$ -МОН-транзистора використана пластина кремнію  $p$ -типу з питомим опором  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  і орієнтацією (100). Области стоку і витоку утворені імплантацією атомів миш'яку з енергією  $80 \text{ кеВ}$  і

дозою  $10^{16}$  іонів/см<sup>2</sup>. Через оксидний шар товщиною 25нм імпантуються атоми бору з енергією 30кеВ і дозою  $\Phi=8 \cdot 10^{11}$  іонів/см<sup>2</sup>. Внаслідок цього біля межі розділення  $Si-SiO_2$  виникає шар негативних зарядів. Визначіть розкид порогової напруги  $\Delta U_{пор}$  в даному приладі, якщо  $\epsilon_{ок}=3,9$ . Припускається, що при енергії 30кеВ  $R_p \approx \Delta R_p=34$ нм як для  $Si$ , так і для  $SiO_2$ , значення функції  $erfc(1,56)=0,03$ . Вказівка: кількість іонів бору в кремнії визначається за формулою:

$$\frac{Q}{e} = \int_d^{\infty} \frac{\Phi}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_p} \exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right] dx = \frac{\Phi}{2} \left[ 2 - erfc \frac{R_p - d}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right].$$

7.3.37 Вичисліть середню (статистичну) потужність, яка розсіюється  $n$ -МОН-інвертором (див. рис. 7.6). Параметри приладів:  $U_{ж}=+5В$ ;  $U_{пор1}=+0,6В$ ;  $U_{пор2}=-2В$ ;  $\mu_n=700$ см<sup>2</sup> В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>;  $C_{it}=7,08 \cdot 10^{-8}$ Ф/см<sup>2</sup>;  $b_1/l_1=4$ ;  $b_2/l_2=(1/3)$ .

7.3.38 Просте електричне коло утворене паралельним з'єднанням транзисторів типу  $p$ -МОД;  $n$ -МОН. а). Дайте зображення відповідної принципової схеми; б). Вважаючи, що обидва транзистори працюють в режимі збагачення при  $U_{пор}=-2В$ ;  $U_{ж}=5В$ ;  $k=1$ мА/В<sup>2</sup>, подайте в табличній формі зв'язок між струмом і напругою для такого кола, якщо напруга змінюється від 0 до 15В.

7.3.39 Для КМОН-інвертора (див. рис. 7.7) знайдіть і графічно відобразіть залежність між напругами на вході і на виході. Зауважте, що  $U_3=-17В$ ;  $U_{ж}=-5В$ ;  $U_{пор,p}=U_{пор,n}=2,3$  В;  $k_1=40k_2$ .

7.3.40 Маємо деякий прилад із зарядовим зв'язком: а). Вичисліть поверхневий потенціал при  $U_1'=15В$ ;  $Q=0$ ;  $x_{ок}=0,1$ мкм і  $Na=10^{15}$ см<sup>-3</sup>. б). Знайдіть максимальний заряд, який може бути накопичений при умовах вказаних в п. а).

7.3.41. Відомо, що двофазний ПЗЗ створений на підкладці  $p$ -типу з орієнтацією (100), причому  $Na_n=10^{16}$ см<sup>-3</sup>;  $Q=10^{10}$ . $e=1,6 \cdot 10^{-9}$ Кл/см<sup>2</sup>. Затвор з полікристалічного кремнію легований домішкою з концентрацією  $N_d=10^{18}$ см<sup>-3</sup> і має товщину оксидного шару  $x_{ок}=50$ нм. Затвор з алюмінію

має товщину оксидного шару  $x_{ок}=100\text{нм}$ . До однієї з доз подано імпульс напруги амплітудою 8В. Вичисліть: а) скачок напруги, який утворює потенціальну яму; б) максимальний накопичуваний заряд; в) мінімальний заряд, який ще можна визначити, якщо густина струму витоку, що обумовлений поверхневою генерацією складає  $1\text{нА/см}^2$ , а частота синхронізації – 2МГц. Вихідні дані:  $\epsilon_0\epsilon_{ок}=3.4\cdot 10^{-13}\text{Ф/см}$ ;  $e\Phi_{\lambda}(Al)=4,1\text{еВ}$ ;  $E_g(Si)=1,12\text{еВ}$ ;  $n_i=1,4\cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ ;  $e\lambda_{\eta}(Si)=4,15\text{еВ}$ ;  $\epsilon_0\epsilon_H=1,04\cdot 10^{-12}\text{Ф/см}$ .

7.3.42 Знайдіть мінімальний струм, який необхідно забезпечити при запису інформації в елемент пам'яті (див. рис. 7.8) при  $I_i=10\text{мкА}$ ,  $\alpha_{\text{кт}}=0,2$ ;  $\alpha_{\text{ін}}=0,9$ ;  $\beta_{\text{КЕК}}=3$ .

7.3.43 Знайдіть інформаційний заряд в елементі пам'яті (див. рис. 7.9) при  $U_{\text{пор1}}=5\text{В}$ ,  $U_{\text{пор0}}=1\text{В}$ ; товщина шару  $\text{SiO}_2$  між затворами 4 і 3, а також затвором 4 і підкладкою дорівнює 0,05мкм.

7.3.44 Аналогова лінія затримки вміщує трифазний ПЗЗ, що має 1000 комірок, і працює при тактовій частоті 1МГц. Коефіцієнт затування, що припадає на 1 комірку, дорівнює  $10^{-4}$ . Вичисліть затування і фазовий зсув сигналу на частоті 10кГц і на третій гармоніці цієї частоти. Вказівка: якщо  $f$  – частота сигналу на вході, то амплітуда сигналу на виході ПЗЗ визначається за формулою:

$$\frac{A_n}{A_0} = \exp\left[-n \cdot k_{\text{зат}} \left(1 - \cos \frac{2\pi f}{f_c}\right)\right],$$

де  $A_n$  – амплітуда сигналу після проходження  $n$  ступенів ( $n=3m$ );  $A_0$  – початкова амплітуда пакета заряду;  $k_{\text{зат}}$  – коефіцієнт затування;  $f_c$  – частота синхронізації. Фазовий зсув  $\Delta\phi=n \cdot k_{\text{зат}} \sin(2\pi/f_c)$ .

7.3.45 Запам'ятовувальний пристрій на базі двофазного ПЗЗ має електроди з однаковою довжиною і шириною 8мкм. Відстань між ними також дорівнює 8мкм. а). Знайдіть площину, яку займає комірка пам'яті, яка складається з двох електродів. б). Відомо, що пристрій пам'яті ємністю 64К (65536 біт) розташовано на кристалі площею 5,54x5,97мм. Визначить,

яку частину площі кристалу займають допоміжні кола (синхронізації, елементи узгодження тощо).

7.3.46 Відносно до ПЗЗ, розглянутого у вправі 7.1.10, на основі отриманих раніше результатів знайдіть: а) напруженість електричного поля розсіювання, якщо відстань між сусідніми електродами складає 3 мкм; б) час розповсюдження зарядів під дією поля розсіювання, якщо кожному електроду відповідає потенціальна яма глибиною  $U_3=20\text{В}$ . Вважайте, що в початковому стані  $10^6$  електронів рівномірно заповнюють потенціальну яму глибиною  $U_3=10\text{В}$ . Відомо, що рухливість електронів на поверхні  $\mu_n=650\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Вказівка: час розповсюдження  $\tau = \int_0^{x_1} \frac{dx}{v(x)}$ .

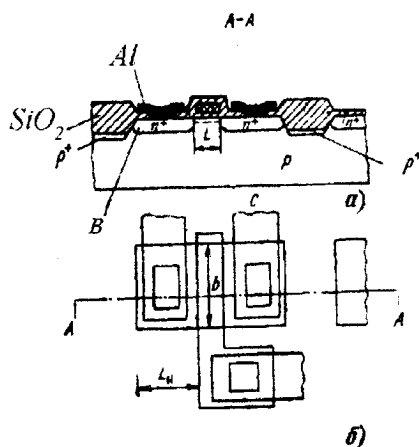


Рисунок 7.1

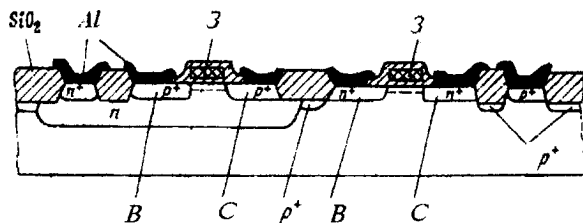


Рисунок 7.2

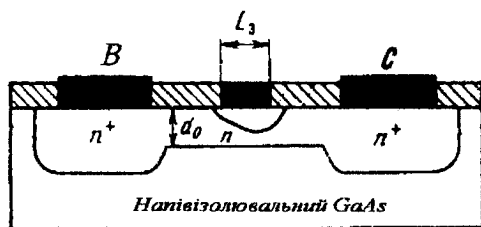


Рисунок 7.3

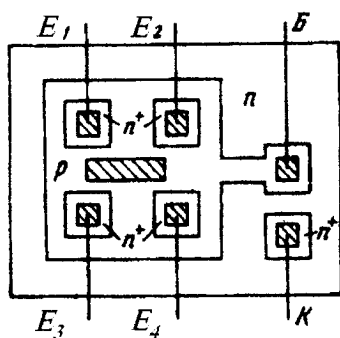


Рисунок 7.4

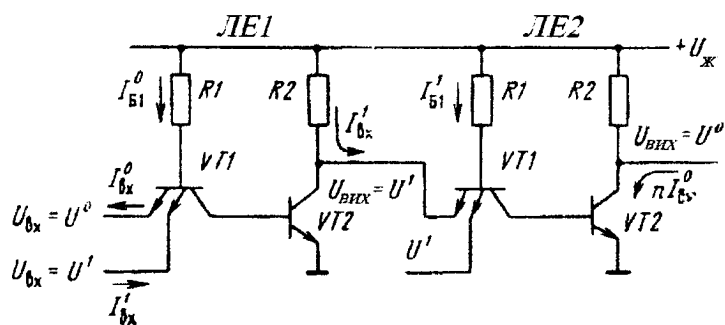


Рисунок 7.5



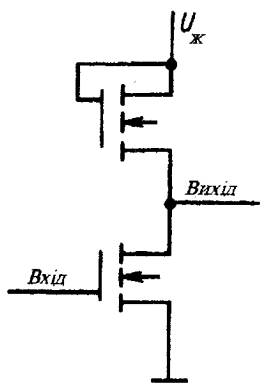


Рисунок 7.6

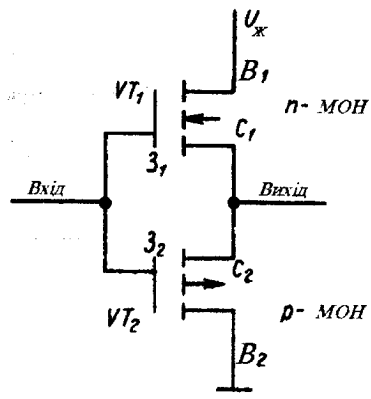


Рисунок 7.7

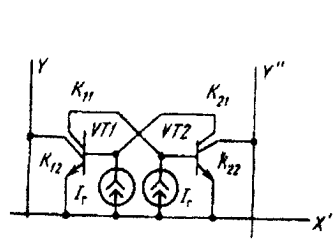


Рисунок 7.8

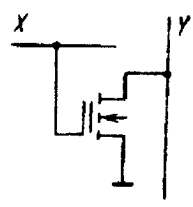
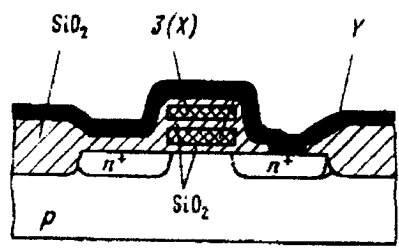
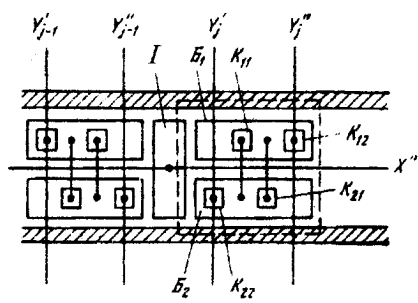


Рисунок 7.9

## ВІДПОВІДІ

### Тема 1

1.3.1  $F_n(T_1) = 4,54 \cdot 10^{-5}$ ;  $F_n(T_2) = 6,74 \cdot 10^{-3}$ .

1.3.2  $p = 10^{14} \text{ м}^{-3}$ .

1.3.3  $W_c - W_F = 0,12 \text{ eВ}$ .

1.3.4  $\Delta T = 8,3 \text{ К}$ .

1.3.5 Збільшиться в 891 раз.

1.3.6  $n_i = 8,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

1.3.7  $W_F - W_V = 0,326 \text{ eВ}$ .

1.3.8  $n_0 = 1,18 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ;  $p_0 = 3,8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ .

1.3.9  $p_{(300)} = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ;  $p_{(400)} = 1,93 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

1.3.10  $n_{i(300)} = 1,72 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ;  $n_{i(500)} = 7,23 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ .

1.3.11  $W_c - W_F = 0,179 \text{ eВ}$ .

1.3.12  $N = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

1.3.13  $n_i = 1,5 \cdot 10^{23} \gg N_d - N_a$ .

	$f_{i(0,1)}$	$f_{i(0,1)}$
1.3.14 150	$4,4 \cdot 10^{-1}$	22,72
300	0,02	47,8
1000	0,31	3,19

1.3.15 I 0,373    II 0,017.

1.3.16  $\frac{\Delta W}{R} - (W_c - W_i) = -0,0077 \text{ eВ}$ .

1.3.17  $W_c - W_F = 38 \text{ meВ}$ .

1.3.18  $p_{Si} / p_{GaAs} = 16,5 \cdot 10^6$ .

1.3.19  $p_0 = 1,4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ;  $n_0 = 3,0 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ .

1.3.20  $F_n(W) = 4,59 \cdot 10^{-1}$ ;  $F_p(W_V) = 3,74 \cdot 10^{-14}$ .

1.3.21 а)  $F_p(W_V) = 0,405$  при 300К;  $F_p(W_V) = 8,96 \cdot 10^{-2}$  при 50К.

$$\delta) F_n(W_c) = 8,36 \cdot 10^{-12}.$$

$$1.3.22 W_F - W_V = 153,5 \text{ meB}.$$

$$1.3.23 W_c - W_F = 0,114 \text{ eB}; p(500) = 10^{14} \text{ M}^{-3}.$$

$$1.3.24 \rho = 6500 \text{ OM} \cdot \text{cm}.$$

$$1.3.25 \rho = 14,9 \text{ OM} \cdot \text{cm}.$$

$$1.3.26 13500 < 30000 < 135000.$$

$$1.3.27 V_T \gg V_d.$$

$$1.3.28 \beta_i = 3,05.$$

$$1.3.29 \beta_p = 4002.$$

$$1.3.30 \gamma_i = 1,95 \text{ CM} \cdot \text{M}^{-1}.$$

$$1.3.31 t = 56 \text{ мкс}.$$

$$1.3.32 S = 0,42 \text{ OM} \cdot \text{M}.$$

$$1.3.33 \rho = 0,55 \text{ OM} \cdot \text{M}.$$

$$1.3.34 \gamma_n / \gamma_r = 0,566.$$

$$1.3.35 p_{(500)} / p_{(300)} = 5,2 \cdot 10^8 \text{ раз}.$$

$$1.3.36 \rho_i = 0,51 \text{ OM} \cdot \text{M}.$$

$$1.3.37 N_u = 2,35 \cdot 10^{10} \text{ CM}^{-3}.$$

$$1.3.38 N_d = 1,56 \cdot 10^{21} \text{ M}^{-3}.$$

$$1.3.39 n_i = 1,16 \cdot 10^{18} \text{ M}^{-3}.$$

$$1.3.40 v_n = 14 \frac{\text{M}}{\text{c}}; v_p = 5 \frac{\text{M}}{\text{c}}.$$

$$1.3.41 p = 6,965 \cdot 10^{20} \text{ M}^{-3}; n = 6,72 \cdot 10^{17} \text{ M}^{-3}.$$

$$1.3.42 n = 1,47 \cdot 10^{19} \text{ M}^{-3}; p = 3,01 \cdot 10^{19} \text{ M}^{-3}.$$

$$1.3.43 \gamma_i / \gamma = 1,065.$$

$$1.3.44 \bar{l} = 86,3 \text{ нм}.$$

$$1.3.45 a) j = 10^3 \frac{\text{A}}{\text{CM}^2}; \bar{b}) t = 2,56 \cdot 10^{-8} \text{ c}; \bar{a}) \frac{j_p}{j_n} = 1,1 \cdot 10^6.$$

$$1.3.46 t = 0,36 \text{ мкс}.$$

## Тема 2

2.3.1  $D_p = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

2.3.2  $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

2.3.3  $L_p = 0,72 \text{ мм}$ .

2.3.4  $\tau_n = 230 \text{ мкс}$ .

2.3.5 4,7%.

2.3.6 Уменьшилась в 2,67 раза.

2.3.7  $L_p = 0,693 \text{ мм}$ .

2.3.8 276 мкс; 40 мкс; 99 мкс.

2.3.9  $L_p \approx 72 \text{ мкс}$ .

2.3.10  $\tau = 0,14 \text{ мс}$ .

2.3.11  $\Delta n(t) = 6,25 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ .

2.3.12.  $\tau = 3,91 \cdot 10^{-1} \text{ с} = 39,1 \text{ мс}$ .

2.3.13  $L_n = 0,67 \text{ мм}$ .

2.3.14  $\Delta n = \Delta p = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ;  $n = 10^7 \text{ см}^{-3}$ ;  $p = 5,76 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

2.3.15  $t_{(s^{90})} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 6 \text{ мс}$ .

2.3.16  $10^{18}$ .

2.3.17  $\Delta n = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

2.3.18  $\Delta p = 3,85 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ .

2.3.19  $W_{Fn}(\text{eВ}) = 0,18 + W_i$ ;  $W_{Fp}(\text{eВ}) = W_i - 1,36$ .

2.3.20  $j_{pd} = j_{pd} = 3,2 \cdot 10^{-20} N_a A \cdot \text{см}^{-2}$ .

2.3.21  $W_i = 500 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ .

2.3.22 1)  $n_n = 2,26 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $p_n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;

2)  $n_n = 1,225 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $p_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

2.3.23  $\tau_p = 10 \text{ мкс}$ .

2.3.24  $N_a = p = 2,35 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

2.3.25  $\Delta \gamma_i / \gamma_i = 1,73 \cdot 10^{-2} = 1,73\%$ .

2.3.26  $\gamma / \gamma_i = 0,29$ .

2.3.27  $\mu_p = 0,069 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_n = 2,75 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

$$2.3.28 \rho_i = 0,488 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

$$2.3.29 \gamma_i / \gamma_{\min} = 5,15.$$

$$2.3.30 p = 10^{16} \text{ м}^{-3}.$$

$$2.3.31 I = 89,6 \text{ мА.}$$

$$2.3.32 n = 4,126 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}; p = 1,125 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}; j = 583,3 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}.$$

$$2.3.33 \rho_{i(300)} = 4,1 \text{ МОм}\cdot\text{м}; \rho_{i(500)} = 27,1 \text{ МОм}\cdot\text{м.}$$

$$2.3.34 \rho = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

$$2.3.35 p = 1,05 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}; \rho = 6,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

$$2.3.36 \rho_i / \rho = 1050.$$

$$2.3.37 \text{ а) } N_a = 1,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}; \text{ б) } N_a / N_{Ga} = 6,32 \cdot 10^{-9};$$

$$\text{в) } \gamma = 0,18 \text{ см/см.}$$

$$2.3.38 N_{(Ga)} = 4,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}; X_{(Ga)} = 2,24 \cdot 10^{-6} \text{ \%}.$$

$$2.3.39 \rho = 6,87 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

$$2.3.40 \rho = 7,3 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

$$2.3.41 j_p / j_n = 1,1 \cdot 10^{-6}.$$

$$2.3.42 t = 0,36 \text{ мкс.}$$

$$2.3.43 N_{\text{np}} < 7 \cdot 10^{-7}.$$

$$2.3.44 N_{\text{Sn(In)}} = 2,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}; N_{\text{Sn(Sb)}} = 0,14 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

$$2.3.45 n = 0,37 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}; p = 7,9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}.$$

$$2.3.46 \Delta\gamma / \gamma_{(Cu)} = -\alpha_p \Delta T = -4,3 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta\gamma / \gamma_{(Ge)} = W_0 \Delta T / (2kT^2) = 0,05.$$

### Тема 3

$$3.3.1 \Delta W = 1,77 \text{ эВ.}$$

$$3.3.2 \lambda_{\min} = 869 \text{ нм.}$$

$$3.3.3 \lambda = 0,82 \text{ мкм.}$$

$$3.3.4 \Phi(h) / \Phi(0) = 3,5 \text{ \%}.$$

$$3.3.5 \Delta n = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

- 3.3.6.  $\Delta\gamma/\gamma=0,12$ .
- 3.3.7  $\Delta\gamma/\gamma=11$ .
- 3.3.8  $I_{\phi}=32,5\text{мкА}$ .
- 3.3.10  $W_c-W_0=-1,31\text{еВ}$ .
- 3.3.11  $\alpha_p=-4,3\cdot 10^{-3}\text{К}^{-1}$ .
- 3.3.13  $\alpha=2,56\cdot 10^4\text{м}^{-1}$ ;  $\delta=4,1\cdot 10^{-6}\text{м}$ .
- 3.3.14  $\Delta W\geq 1,7\text{еВ}$ .
- 3.3.15 2200.
- 3.3.16  $\Delta W=2,2\text{еВ}$ .
- 3.3.17  $2,84\cdot 10^{13}\text{с}^{-1}$ .
- 3.3.18 Зменшитися в 2 рази.
- 3.3.19 Не зміниться.
- 3.3.20  $\Delta W_{T1}=2,3\text{еВ}$ ;  $\Delta W_{T2}=1,77\text{еВ}$ .
- 3.3.21  $I_{\phi}=0,84\text{нА}$ .
- 3.3.22  $l=18,8\text{мм}$ .
- 3.3.23  $\mu=0,98\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .
- 3.3.24  $\gamma=480\text{см}\cdot\text{м}^{-1}$ .
- 3.3.25  $n=10^{22}\text{м}^{-3}$ .
- 3.3.26  $\mu_n=0,3\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .
- 3.3.27  $U_n=0,74\text{нВ}$ .
- 3.3.28  $F_n=0,28\cdot 10^{18}\text{Н}$ .
- 3.3.29  $E_n=6\text{В/м}$ ;  $E_j=5\text{В/м}$ .
- 3.3.30  $R_{H(40)}=-5,95\cdot 10^{-2}\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $R_{H(400)}=6,25\cdot 10^{-4}\text{м}^3/\text{кг}$ .
- 3.3.31  $\mu_n=0,177\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ;  $n=2,98\cdot 10^{21}\text{м}^{-3}$ .
- 3.3.32  $\Delta W_d=4,9\cdot 10^{-2}\text{еВ}$ .
- 3.3.33  $U=5,83\text{В}$ .
- 3.3.34 *n*-тип.
- 3.3.35 а), б) зменшитися в 2 рази; в) лишається незмінною.
- 3.3.36  $R_{H(300)}=-0,12\text{м}^3/\text{Кл}$ ;  $R_{H(500)}=-1,34\cdot 10^{-4}\text{м}^3/\text{Кл}$
- 3.3.37  $U_{II}=18,7\text{мВ}$ .

- 3.3.38  $U_H=1,44\text{В}$ .  
 3.3.39  $j_p/j_n=0,99$ .  
 3.3.40  $J_p/j_n=0,672$ .  
 3.3.41  $p/n=7,84$ .  
 3.3.42  $p=4,67 \cdot 10^{20}\text{м}^{-3}$ .  
 3.3.43  $n_0=10^7\text{см}^{-3}$ .  
 3.3.44  $R_H=62,5\text{см}^3/\text{Кл}$ .  
 3.3.45  $\mu_n=2941\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

#### Тема 4

- 4.3.1  $U_0=0,326\text{В}$ .  
 4.3.2  $U_0=0,745\text{В}$ .  
 4.3.3  $e \cdot U_0=0,215\text{еВ}$ .  
 4.3.4  $e \cdot U_0=0,679\text{еВ}$ .  
 4.3.5  $U_0=0,46\text{В}$ .  
 4.3.6  $U_0=1,28\text{В}$ ;  $U_{0(\text{GaAs})}/U_{0(\text{Si})}=1,5$ .  
 4.3.7  $U_0=0,35\text{В}$ .  
 4.3.8 а)  $j_0=0,31\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $I_{op}/I_{om}=100$ ; б)  $U=0,328\text{В}$ ;  
 4.3.9  $U_0=0,8\text{В}$ .  
 4.3.10 а)  $U_0=0,3\text{В}$ ; б)  $I_0=0,51\text{мкА}$ ; в)  $I_{op}/I_0=0,98$ .  
 4.3.11  $U_0=0,44\text{В}$ ;  $j_0=4 \cdot 10^7\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$ .  
 4.3.12 а)  $j_p/j_n=28,8$ ; б)  $j_0=1,05\text{мкА}/\text{м}^2$ ;  $j=0,081\text{А}/\text{м}^2$ .  
 4.3.13  $I_0=2,7 \cdot 10^{13}\text{А}$ .  
 4.3.14  $U_{np(\text{Ge})}=288\text{мВ}$ ;  $U_{np(\text{Si})}=407\text{мВ}$ .  
 4.3.15 Ge:  $R_{np}=2,88\text{Ом}$ ;  $R_{зв}=5 \cdot 10^6\text{Ом}$ ;  
 Si:  $R_{np}=4,07\text{Ом}$ ;  $R_{зв}=5 \cdot 10^8\text{Ом}$ .  
 4.3.16  $I=10\text{мкА}$ .  
 4.3.17  $I=1\text{мА}$  при  $U=0,137\text{В}$ ;  $I=10\text{мА}$  при  $U=0,196\text{В}$ .  
 Уточнені результати:  $I=1\text{мА}$  при  $U=0,157\text{В}$ ;  $I=10\text{мА}$  при  $U=0,398\text{В}$ .  
 4.3.18  $U=0,69\text{В}$ .

- 4.3.19 а)  $U_{0(\text{Si})}=0,64\text{В}$ ;  $U_{0(\text{Ge})}=0,25\text{В}$ .  
 б)  $W_{(\text{Si})}=2,9\text{мкМ}$ ;  $W_{(\text{Ge})}=2,1\text{мкМ}$ .
- 4.3.20 а)  $W=0,106\text{мкМ}$ ; б)  $U=1,06\text{В}$ .
- 4.3.21  $p/n=0,01$ ; 1%; низький рівень.
- 4.3.22 а)  $U_0=0,87\text{В}$ ; б)  $U_{\text{max}}=0,67\text{В}$ .
- 4.3.23  $I_0=3,1\text{мкА}$ ;  $U_{i0}=0,15\text{В}$ .
- 4.3.24  $U_0=0,359\text{В}$ .
- 4.3.25  $R_{\text{np}}=850\text{Ом}$ .
- 4.3.26 Дрейфова електронна складова.
- 4.3.27  $n$ -область.
- 4.3.28  $N_a=1,6 \cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ ;  $N_d=1,6 \cdot 10^{15}$ .
- 4.3.29  $U_{\text{np}}=0,118\text{В}$ .
- 4.3.30  $U_{\text{np}}=0,118\text{В}$ ;  $U_{\text{np}}=0,12\text{В}$ .
- 4.3.31  $L_n=1,83\text{мм}$ .
- 4.3.32  $U_{(293\text{К})}=0,66\text{В}$ ;  $U_{(125^\circ\text{C})}=0,5\text{В}$ .
- 4.3.33 Зменшаться в 2 рази.
- 4.3.34  $U_0=0,48\text{В}$ ;  $C_{\text{min}}=0,75\text{пФ}$ .
- 4.3.35  $U_{\text{зс}}=44,1\text{В}$ .
- 4.3.36  $C_6=63,3\text{пФ}$ .
- 4.3.37 При  $U_{\text{зс}}=0,1\text{В}$ ;  $W=1,33 \cdot 10^{-4}\text{см}$ ;  $C_6=107\text{пФ}$ .  
 При  $U_{\text{зс}}=10\text{В}$ ;  $W=7,76 \cdot 10^{-4}\text{см}$ ;  $C_6=18,3\text{пФ}$ .  
 При  $U_{\text{np}}=0,1\text{В}$ ;  $W=7,68 \cdot 10^{-5}\text{см}$ .
- 4.3.38  $\Delta C_6=1,75\text{пФ}$ .
- 4.3.39  $n_{p0}=4 \cdot 10^8\text{см}^{-3}$ ;  $p_{n0}=4 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ ;  $U_0=0,44\text{В}$ ;  $I_0=256\text{мкА}$ .
- 4.3.40  $I_p/I_n=186,8$ ;  $j_{\text{np}}=7,2 \cdot 10^{-6}\text{А}\cdot\text{см}^{-2}$ .
- 4.3.41 а)  $p_p=10^{24}\text{м}^{-3}$ ;  $n_p=10^{14}\text{м}^{-3}$ ;  $n_n=10^{22}\text{м}^{-3}$ ;  $p_n=10^{16}\text{м}^{-3}$ ;  
 б)  $\gamma_p=3,2 \cdot 10^4\text{См}\cdot\text{см}$ ;  $\gamma_n=6,4 \cdot 10^2\text{См}\cdot\text{см}$ ;  
 в)  $U_0=0,46\text{В}$ ; г)  $D_p=0,005\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $D_n=0,01\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ;  
 д)  $I_0=0,04\text{мкА}$ ; е)  $W=1,4\text{мкМ}$ ; е)  $C_6=100\text{пФ}$ ; ж)  $I_p/I_n=50$ .
- 4.3.42  $W=0,4\text{мм}$ ;  $U_{\text{зс}}=12\text{кВ}$ .



4.3.43  $E_{\max}=4,2 \cdot 10^7 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $C_6=78 \text{ пФ}$ .

4.3.44 Зменшитися на  $4\pi\Phi$ .

4.3.45 а)  $R=14,5 \text{ кОм}$ ; б)  $r=750 \text{ Ом}$ ; в)  $C_{\text{диф}}=1280 \text{ пФ}$ .

4.3.46  $C_6=98,4 \text{ пФ}$ ;  $W=130 \text{ мкм}$ .

## Тема 5

5.3.1 Активний.

5.3.2 Насичений.

5.3.3 Інверсний.

5.3.4 Відсічки.

5.3.5  $+12,5 \text{ В}$ .

5.3.6  $-9,2 \text{ В}$ .

5.3.7 А-К; Б-Б; В-Е;  $\alpha_c=50$ .

5.3.8  $I_K=4 \text{ мА}$ .

5.3.9  $I_p=7,5 \text{ мА}$ .

5.3.10  $\gamma=0,99$ .

5.3.11  $\alpha=0,99$ .

5.3.12  $\frac{I_{pE}}{I_{nE}} = 1/200$ .

5.3.13  $U_{BE}=0,1853 \text{ В}$ ;  $U_{BK}=0,179 \text{ В}$ .

5.3.14  $U_{KE}=-0,0063 \text{ В}$ .

5.3.15  $I_B=5,9 \text{ мА}$ .

5.3.16  $\alpha=0,98$ ;  $h_{21E}=50$ ;  $I_{KE0}=5,1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ .

5.3.17  $I_K=4,78 \text{ мкА}$ ;  $I_A=0,227 \text{ мкА}$ .

5.3.18  $\alpha=0,98$ ;  $\gamma=0,99$ .

5.3.19  $I_K \approx 1,3 \text{ мА}$ .

5.3.20  $\tau_n=0,9 \text{ мкс}$ .

5.3.21  $I_E=18,6 \text{ мА}$ ;  $I_K=18 \text{ мА}$ ;  $I_A=0,6 \text{ мА}$ .

5.3.22  $I_E=21,6 \text{ мА}$ ;  $I_K=21,4 \text{ мА}$ ;  $I_A=0,2 \text{ мА}$ .

5.3.23  $I_E=-10^{-8} \text{ А}$ ;  $I_K=11 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ ;  $I_B=-12 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ .

5.3.24  $I_K \approx 8,1 \text{ мА}$ .

5.3.25  $2 \cdot 10^5$ .

5.3.26  $2 \cdot 10^{15}$ .

5.3.27  $10^{10}$ .

5.3.28  $\beta = 341,88$ .

5.3.29  $\gamma = 0,9975$ .

5.3.30  $\beta_T = 0,99875$ .

5.3.31  $\beta = 266$ .

5.3.32  $15,4 \text{ кОм}$ .

5.3.39  $I_E = -0,144 \text{ мкА}$ ;  $I_K = 1,54 \text{ мкА}$ .

5.3.40 а)  $I_E = -58,7 \text{ мкА}$ ;  $I_K = -57,5 \text{ мкА}$ ; б)  $U_{KE} = 0,11 \text{ В}$ .

5.3.41  $0,6 \text{ А}$ ; кремнієвий.

5.3.42  $U_{KE} = 5,62 \text{ В}$ ;  $I_E = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ ;  $I_K = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ ;  $I_B = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ .

5.3.43  $18,9 \text{ В}$ .

5.3.44  $7,3 \text{ мкм}$ .

5.3.45  $\beta = 81$ .

5.3.46  $U_{\sigma} = 14 \text{ мВ}$ .

## Тема 6

6.3.1 а)  $Q_B = \left( 4eE_0E_H N_a \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}}$ ;  $U_S = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$ ;

$$E_{(x=0)} = \left( \frac{4N_a kT}{E_0E_H e} \ln \frac{N_a}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

6.3.2  $Q_B = -6,18 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$ .

6.3.3 а)  $U_S = 0,324 \text{ В}$ ; б)  $U_i = 0,943 \text{ В}$ .

6.3.4  $U_{\text{пер}} = 1,4 \text{ В}$ .

6.3.5  $C = C_{\text{пор}} = 7,13 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/см}^2$ .

6.3.6  $U_{\text{нз}} = -0,93 \text{ В}$ .

6.3.7  $U_{\text{пор}} = -1,46 \text{ В}$ .

6.3.8  $U_{пер} = -3,218В$ .

6.3.9  $Q_{SS}/e = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

6.3.10  $U_{пор} = -2,17В$ ;  $C_{мин} = 8,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/см}^2$ .

6.3.11 а)  $Q_{SS} = 8,1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;

б)  $-9,36 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$ ;  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ ;  $6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$ .

6.3.12 а)  $\omega_n = 19\text{нм}$ ;  $2\text{нм}$ ;  $0,289\text{нм}$ ;

б)  $U_{пер} = -60\text{мВ}$ ;  $248,1\text{мВ}$ ;  $942\text{мВ}$ .

6.3.13 а)  $U_{ПЗ} = 44,51\text{мВ}$ ; б)  $U_{ПЗ} = 44,51\text{мВ}$ ; в)  $U_{ПЗ} = 44,51\text{мВ}$ .

6.3.14 а)  $U_{пер} = -3,6В$ ;  $-28В$ ;

б)  $f_{зр} = \frac{\mu_n}{2\pi l^2} (U_з - U_{пор})$ ;  $f_{зр} = 3,3\text{ГГц}$ ;  $10,5\text{ГГц}$ .

6.3.15  $S = 172,5\text{мкА/В}$ ;  $S_{нас} = 103,5\text{мкА/В}$ .

6.3.16  $Q_p = 2,32 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$ .

6.3.17  $\omega_n = 0,3\text{мкм}$ ;  $U_{ПЗ} = 1,64В$ ;  $U_{пор} = -4,424В$ .

6.3.18  $U_{пер} = 2,33В$ .

6.3.19  $U_{пер} = -8,05В$ .

6.3.20 а)  $I_{c_{нас}} = 2,17\text{мА}$ ; б)  $I_c = 1,77 \cdot 10^{-4} (U_з - U_{пор})^2$ , де струм виражений в амперах, а напруга – у вольтгах; г)  $R = 2,8 \text{ кОм}$ ;  $R' = 28 \text{ кОм}$ .

6.3.21 а)  $U_{пер} = -4В$ ;  $N_a = 5,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

6.3.22  $I_{c_{нас}} = 0,212\text{мА}$ .

6.3.23  $I_{c_{нас}} = 1,278\text{мА}$ ;  $S_{c_{нас}} = 0,637\text{мкА/В}$ .

6.3.24 А-затвор, канал р-типу.

6.3.25  $U_{пер} = 6,8В$ .

6.3.26  $U_{зв} = 3,83В$ .

6.3.27  $U_{вис} = 8,5В$ .

6.3.28  $a/2 = 0,87 \text{ мкм}$ .

6.3.29  $S = 0,32 \text{ мА/В}$ .

6.3.30  $I_c = 0,25 \text{ мА}$ .

6.3.31  $S = 0,25 \text{ мА/В}$ ;  $S_{max} = 0,5 \text{ мА/В}$ .

6.3.32  $I_c = 0$ ;  $2,5\text{мА}$ ;  $0,5\text{мА}$ .

- 6.3.33  $S=0$ ; 0,8мА/В; 0,4мА/В.
- 6.3.34  $S=5,57$ мА/В.
- 6.3.35  $I_c=0$ ; 0,5мА.
- 6.3.36  $S=0$ ; 80 мА/В; 40 мА/В.
- 6.3.37  $U_0=0,635$  В;  $U_{\text{вл.с}}=0,558$  В.
- 6.3.38  $R_0=6,7 \cdot 10^{11}$  Ом;  $S=-7,56 \cdot 10^{-10}$  А/В;  $S_{\text{нас}}=46,59 \cdot 10^{-9}$  А/В.
- 6.3.39  $U_{\text{вл.с}}=0,87$ В;  $I_{c \text{ нас}}=1,56$ мА.
- 6.3.40  $U_i=-7,69$ В.
- 6.3.41  $U_{\text{вл.с}}=-2,69$ В.
- 6.3.42  $2\alpha_{\text{эф}}=1,94$ мкм.
- 6.3.43  $R_k=12,9$  кОм.
- 6.3.44 а)  $K_U=10$ ; б)  $K_U=15$ ; в)  $K_U=20$ .
- 6.3.45 а)  $I_{c \text{ нас}}=889$ мкА; 775мкА; в)  $C_0=1,77 \cdot 10^{-13}$ Ф;  $f_{\text{ГП}}=35$ МГц.
- 6.3.46 б) 0,303; 0,546; 0,738; 0,888.

## Тема 7

- 7.3.1  $t=3,3$ ГОДИНИ.
- 7.3.2  $x_{\text{пер}}=0,94$ мкм.
- 7.3.3 а)  $t=1,32 \cdot 10^4$ с; б)  $x=2,8$ мкм.
- 7.3.4  $T=1155,6^\circ\text{C}$ .
- 7.3.5  $N_a(W) = N_a(0)e^{-\eta}$ , де  $\eta = \ln \left[ \frac{N_a(0)}{N_a(W)} \right] = 3,86$ .
- 7.3.6  $t=44$ хв.
- 7.3.7  $t=37,7$ хв.
- 7.3.8  $t=1$ год.
- 7.3.9 0,019мкм.
- 7.3.10  $R_s = 2,67 \frac{\text{Ом}}{\text{мм}}$ ;  $l=4,75$ мм.
- 7.3.12  $C_1=1,05$ пФ;  $C_2=3,0$ пФ.
- 7.3.13  $A \approx 0,32$ мм<sup>2</sup>.
- 7.3.18  $1,7 \cdot 10^3$ .

7.3.19 б) перша з приведених схем;

в) п'ята схема;

г) перша і третя схеми мають найменше, а друга – найбільше значення зворотного струму.

7.3.20 Щоб уникнути діодного ефекту і отримати омичний контакт, кремній, що прилягає до алюмінію, легують донорною домішкою.

7.3.21 Ефект пояснюється великою товщиною бази.

7.3.23 а) тому, що такий прилад замінює транзистор і декілька діодів;  
б) зменшиться.

7.3.24  $R \approx 42$  кОм;  $C_R = 0,08$  пФ.

7.3.25 5 пФ.

$$7.3.26 \text{ б) } I_c = \frac{WC_0\mu_p}{2L} (U_{\text{нас}} - U_{\text{пор}})^2.$$

7.3.28 а)  $U_c = U_{\text{пор}}$ ;

б) при насиченні  $U_c = U_{3 \text{ нас}} > U_{3 \text{ нас}} - U_{\text{пор}}$ .

7.3.32  $-(1,7 \dots 2,2)$  В.

7.3.35 а)  $I_{\text{вх}}^0 = 0,8$  мА;  $I'_{\text{вх}} = 27$  мкА;

б)  $I_{\text{вх}}^0 = 0,74 \dots 0,82$  мА;  $I'_{\text{вх}} = 40 \dots 48$  мкА.

7.3.36  $\Delta U_{\text{пор}} = 0,91$  В.

7.3.37  $P_{\text{роз.ср.}} = 82,5$  мкВт.

7.3.38 б)

$U_{\text{вх}}$ , В	0	1	2	3	4	5	10
$I_{\text{вх}}/k$	0	12	24	36	49	64	169

$$7.3.39 U_{\text{вих}} = \frac{1}{1+\lambda} \left[ \lambda (U_{\text{вх}} + 2,3) + \sqrt{\lambda ((U_{\text{вх}} + 2,3) - 14,7)^2 - (1+\lambda)} \right],$$

де  $\lambda = 40$ .

7.3.40  $U_S = 13,34$  В; б)  $Q_{\text{max}} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>.

7.3.41 а)  $U = 0,89$  В; б)  $Q_{\text{max}} = 2,4 \cdot 10^{-7}$  Кл/см<sup>2</sup>; в)  $Q_{\text{min}} = 5 \cdot 10^{-16}$  Кл/см<sup>2</sup>.

7.3.42  $I_{\text{min}} = 13$  мкА.

7.3.43  $Q=0,6$  пКл.

7.3.44  $A_n/A_0=0,944$ ;  $\Delta\varphi=0,176$ .

7.3.45 а)  $A=2,56 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>2</sup>; б) 0,508.

7.3.46 а)  $E=3,18 \cdot 10^4$  В/см; б)  $\tau=6,3 \cdot 10^{-11}$  с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы / Под ред. В.А. Терехова. – М.: Высшая школа, 1990.
2. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов / Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
3. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника: Пер. с испан. С.И. Баскакова / Под ред. В.А. Терехова; Предисл. В.А. Терехова. – М.: Высшая школа, 1991. – 351 с.
4. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Навчальне видання

Святослав Іванович Волинець, Олексій Васильович Грабчак,  
Олександр Олександрович Лазарев, Микола Антонович Філінюк

# ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

## Задачі та питання

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор В.О. Дружиніна

Коректор З.В. Поліщук

Підписано до друку *9.04.02р*

Формат 29,7×42  $\frac{1}{4}$  Гарнітура Times New Roman

Друк різнографічний Ум. друк. арк. *4.94*

Тир. 75 прим.

Зам. № *2002 - 095*

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх  
Тел. (0432) 44-01-59