

2.2 МДН – транзистор

МДН - транзистор - польовий транзистор з ізолюючим затвором, в якому ізоляційний шар поміж кожним металевим затвором та каналом є діелектрик.

Існують два різновиди МДН - транзисторів: з індуктованим каналом і з вбудованим каналом. В МДН - транзисторах з індуктованим каналом провідний канал між сильнолегованими областями витіку і стоку не існує, отже помітний струм стоку з'являється тільки при визначеній полярності та при визначеній величині напруги на затворі відносно витіку, яку називають пороговою напругою [1-5].

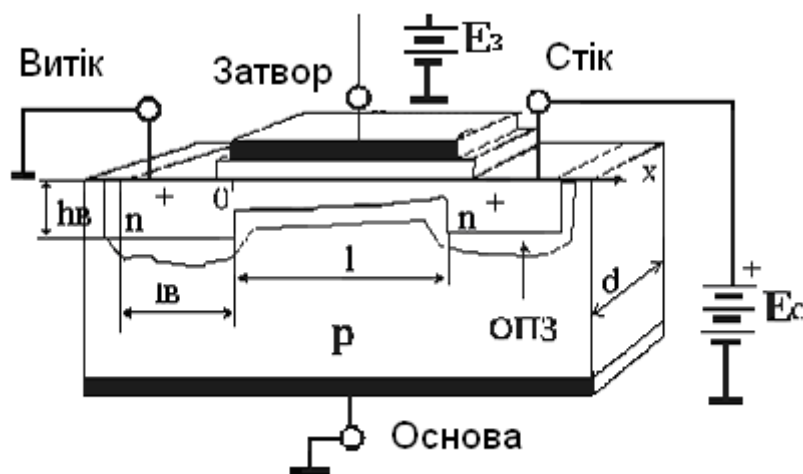


Рисунок 2.2 - МДН транзистор з індуктованим n каналом
Розглянемо, як приклад, розрахунок деяких параметрів транзистора.
Вихідні дані:

- Довжина каналу $l = 5 \times 10^{-6}$ м
- Ширина каналу $d = 5 \times 10^{-4}$ м
- Товщина шару діелектрика $d_0 = 1.2 \times 10^{-7}$ м
- Рухливість дірок $\mu_n = 4 \times 10^{-2}$ м²/Вс
- Порогова напруга $U = -1.8$ В
- Напруга на стоці $U = 4$ В
- Напруга на затворі $-5.6 \dots -15.6$ В, шаг 0,5 В
- Діелектрична проникливість $\epsilon = 4$ Ф/м
- Діелектрична постійна $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м

Розрахуємо крутизну вольт амперної характеристики $I_c(U_3)$ в області насичення:

$$S_{нас} = \frac{\epsilon \partial \epsilon_0 \mu d}{d_0 l} (U_3 - U_n) = 2,1 \cdot 10^{-3} \frac{A}{B} \quad (2.8)$$

Ємність затвору відносно витоку і стоку:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0 l d}{d_0} = 7.38 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \quad (2.9)$$

Частотна межа:

$$f_{\text{макс}} = \frac{S_{\text{нас}}}{2\pi C_3} = 4.58 \cdot 10^8 \text{ Гц} \quad (2.10)$$

Постійна часу заряду ємності затвору:

$$\tau = \frac{C_3}{S_{\text{нас}}} = 6.25 \cdot 10^{-11} \text{ с} \quad (2.11)$$

Розрахуємо значення струму I_c при значеннях напруги на затворі від -5,6В до -15,6 з шагом 0,5В:

$$I_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0 \mu d}{d_0 l} \left((U_3 - U_n) U_c - \frac{U_c^2}{2} \right) \quad (2.12)$$

2.3 Польовий транзистор з керуючим р-п переходом

Польовий транзистор з керуючим р-п переходом являє собою тонку пластину напівпровідникового матеріалу з двома р-п переходами в центральній частині і з омичними контактами по краях.

Чинність цього приладу основана на залежності товщини р-п переходу від доданої до нього напруги. Оскільки збіднений шар майже повністю позбавлений рухомих носіїв заряду, його провідність практично дорівнює нулю. Обмежуючи з бокових сторін струмопровідний канал (напівпровідником пластини), збіднений шар, що утвориться завдяки цьому визначає перетин або ефективну товщину. У залежності від електропровідності напівпровідника канал може бути n- типу або р- типу [2-4].

Як приклад, розглянемо розрахунок деяких параметрів транзистора

Вихідні дані

- Концентрація домішки, $N = 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
- Рухливість електронів, $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$
- Заряд електрона, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$

- Діелектрична проникливість, $\varepsilon = 11,8$
- Діелектрична постійна, $\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- постійна Больцмана $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ еВ}$
- Термін переходу, $t_{\text{пер}} = 0,8 \text{ нс}$
- Напруга на затворі, $U_3 = 39 \text{ В}$
- Розміри напівпровідникового транзистора:
Товщина, $W = 23 \text{ мкм}$
Довжина, $l = 12 \text{ мкм}$
Ширина, $d = 3 \text{ мкм}$

Розрахуємо опір каналу:

$$R_k = \frac{l}{e \mu_n W d N} = 4,83 \cdot 10^2 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Питомий опір:

$$\rho = e n \mu_n = 3,6 \text{ Ом} \cdot \text{см} \quad (2.14)$$

Розрахуємо напругу відсічки:

$$U_{\text{від}} = \frac{W^2}{\varepsilon \rho \mu_n l} = 85,4 \text{ В} \quad (2.15)$$

Граничну частоту визначаємо за формулою:

$$f_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi t_{\text{пер}}} = 2,01 \times 10^5 \text{ Гц} \quad (2.16)$$

Розрахуємо струм стоку при напрузі на стоці 20 В за формулою:

$$I_c = \frac{1}{R_k} \left(U_c + \frac{U_c^{2/3} + U_3^{3/2}}{U_{\text{омс}}} \right) \quad (2.17)$$

Крутизну розрахуємо за формулою:

$$S = \frac{1}{R_k} \left(\frac{1}{3} U_{\text{омс}} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{\text{омс}}}} \right) \right) =$$

$$= 6,71 \cdot 10^{-4} \text{ А/В} \quad (2.18)$$

Розраховуємо струм насичення за формулою:

$$U_{нас} = \frac{1}{R_k} \left(\frac{1}{3} U_{отс} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{отс}}} \right) \right) \quad (2.19)$$

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРА

Тиристор – це напівпровідниковий пристрій з двома стійкими станами: стан з низькою провідністю та з високою провідністю.

Тиристори знайшли застосування у різноманітних пристроях автоматики і обчислювальній техніці. Вони можуть виконувати функції перетворювача струму будь-якої форми, ключа генератора і як запам'ятовуючий пристрій.

До параметрів тиристора відносяться:

- Повторююча напруга $U_{повт}$ ($\approx 0,75 U_{проб}$);
- Напруга включення $U_{вкл}$ (від 10 до 2500 В);
- Струм включення $I_{вкл}$;
- Відпираючий струм управління $I_{у\text{ вип.}}$;
- Час затримки t_3 ;
- Час включення $t_{вкл}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямої напруги $(dU/dt)_{max}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямого струму $(dI/dt)_{max}$.

Повторююча напруга визначається за формулою:

$$U_{повт} = k \inf(U_{пер}, U_{проб}), \quad (3.1)$$

де \inf - менше із значень $U_{пер}$ і $U_{проб}$;

$k = 0,8$ для вітчизняних силових пристроїв.

Знаючи $U_{повт}$, можна визначити напругу переключення при max допустимій температурі структури тиристора ($125^{\circ}C$):

$$U_{пер} = \frac{U_{повт}}{0,8}. \quad (3.2)$$

Для визначення товщини підкладки необхідно розрахувати ширину об'ємного заряду $W_{но}$ при напрузі пробою:

$$W_{но} = 0,52 \sqrt{\rho U}, \quad (3.3)$$

де ρ - питомий опір, Ом·см.

Отже: $S_m = 0,1S_a$ (3.4)

Площа структури $S_{стр}$ з урахуванням шунтировки та зони керування:

$$S_{стр} = S_a + S_{унр} + S_m \quad (3.5)$$

Діаметр цієї структури:

$$d = 2\sqrt{\frac{S_{стр}}{\Gamma}} \quad (3.6)$$

Тиристор має S – образну ВАХ.

$$I = f(E_{np}) \quad (3.7)$$

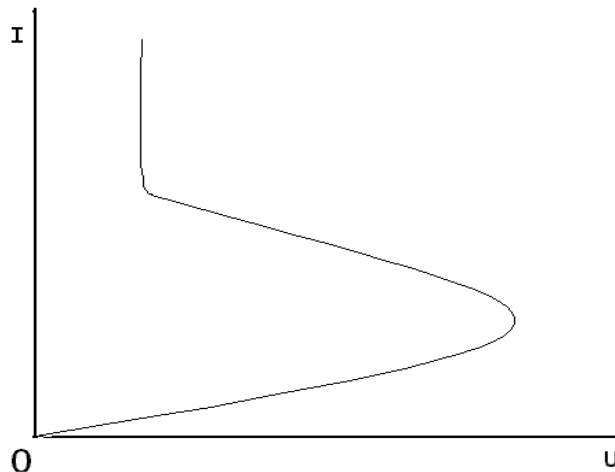


Рисунок 3.1 - Вольтамперна характеристика тиристора

Розрахунок характеристик проводиться за формулою:

$$U_A = U_1 - U_2 + U_3 \quad [1-6] \quad (3.8)$$

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОСТРУКТУР

Оптоелектроніка являє собою розділ науки і техніки, присвячений питанням генерації, перенесення, перетворення, запам'ятовування і зберігання інформації на основі використання електричних і оптичних методів і засобів.

Оптоелектронний пристрій визначається як пристрій чутливий до електромагнітного випромінювання у видимій ІК або УФ областях.

4.1 Фотодіод

Фотодіодом називають напівпровідникові пристрої, основані на внутрішньому фотоефекті, що використовують односторонню провідність р-п - переходу.

Параметри фотодіода:

- ВАХ р – п переходу при освітленні;

$$j = js(e^{cu/KT} - 1) - j_f \quad (4.1)$$

- Вольтова чутливість

$$S_U = \frac{U}{\Phi} \quad (4.2)$$

- Струмова чутливість;
- Пороговий потік

$$\Phi_{пор} = [2c(I_T + I_\phi)\nabla f]^{1/2} \quad (4.3)$$

де ∇f - полоса пропускання.

- Виявляюча спроможність

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{пор}} \quad (4.4)$$

- Світловий струм

$$I_{св} = I_f + I_t \quad (4.5)$$

$$I_f = j_f S; I_t = j_t S, \quad (4.6)$$

де S – густина фото чутливої площини.

- ККД приймача

$$ККД = \frac{P_{ЕЛ.ПОТ}}{P_{НАД.ВИПР}} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

$$\text{де } P_{ЕЛ.ПОТ} = I_{св} \cdot U. \quad (4.8)$$

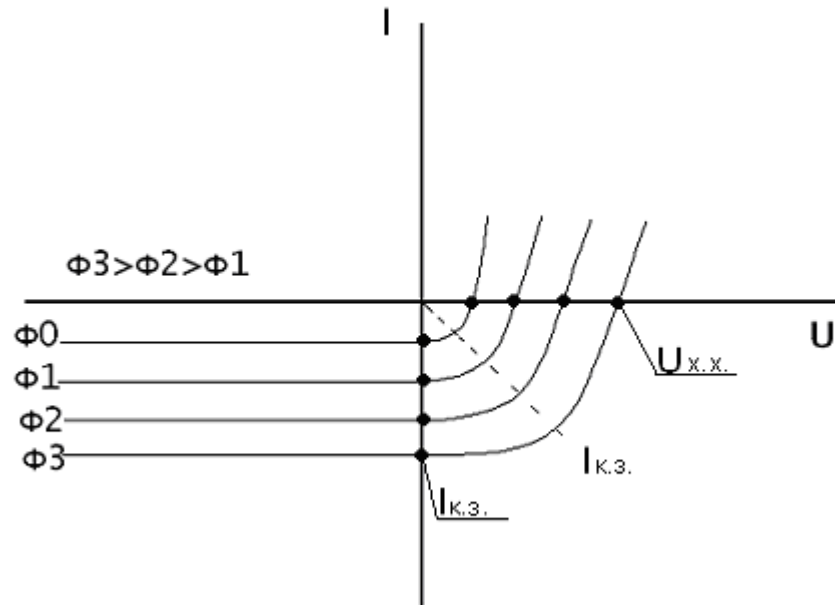


Рисунок 4.1 – Вольтамперна характеристика фотодіода
4.2 Світлодіод

Світлодіод – пристрій, який має високу направленість випромінювання, високу швидкодію, технологічну сумісність з мікроелектронними пристроями, володіє високою надійністю і довговічністю.

Формула для кількісного визначення струму:

$$\frac{U_p}{U_t} = - \frac{pn - ni^2}{\tau_{n0}(p + p_1) + \tau_{p0}(n + n_1)}, \quad (4.9)$$

де p_1, n_1 - концентрація носіїв у зонах, коли рівень Фермі проходить крізь рівень ловушок;

τ_{n0}, τ_{p0} - час життя неосновних носіїв в напівпровіднику.

$$n_1 = p_1 = n_i; \quad (4.10)$$

$$p = n = n_i \exp\left(\frac{qU}{2KT}\right); \quad (4.11)$$

$$\frac{U_p}{U_t} = - \frac{n_i}{\tau_{p0} + \tau_{n0}} \left(\exp\left(\frac{qU}{2KT}\right) - 1 \right). \quad (4.12)$$

Як приклад, запишемо абсолютну величину щільності рекомбінаційного струму:

$$j_{рек} = \frac{q\sigma_{mi}}{\tau_{po} + \tau_{no}} \cdot \left(\exp \frac{qU}{2KT} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$j_{рек} = \frac{q\sigma_{mi}}{\tau_{vo} + \tau_{no}} \cdot \frac{KT}{q(\varphi_{лом} - U)} \left(\exp \frac{qU}{2KT} - 1 \right). \quad (4.13)$$

Визначимо φ_K – величину потенційного бар'єру по формулі:

$$\varphi_K = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \quad (4.14)$$

$$\varphi_K = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{12} \cdot 10^8}{1.21 \cdot 10^{14}} = 0.35B.$$

Ширину ОПЗ – σ – находимо, як ($\varepsilon = 10,9$)

$$\sigma = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_K}{e} \cdot \frac{N_a + N_d}{N_a \cdot N_d} \right)^{1/2} = 2.05 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \quad (4.15)$$

Тоді рекомбінаційний струм:

$$j_{рек} = 3.6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{258.75 \cdot 10^{-4}}{(0.35 - U)} \cdot (\exp 19.3U - 1)$$

$$j_{рек} = \frac{931.5 \cdot 10^{-6}}{(0.35 - U)} (\exp 19.3U - 1) \quad (4.16)$$

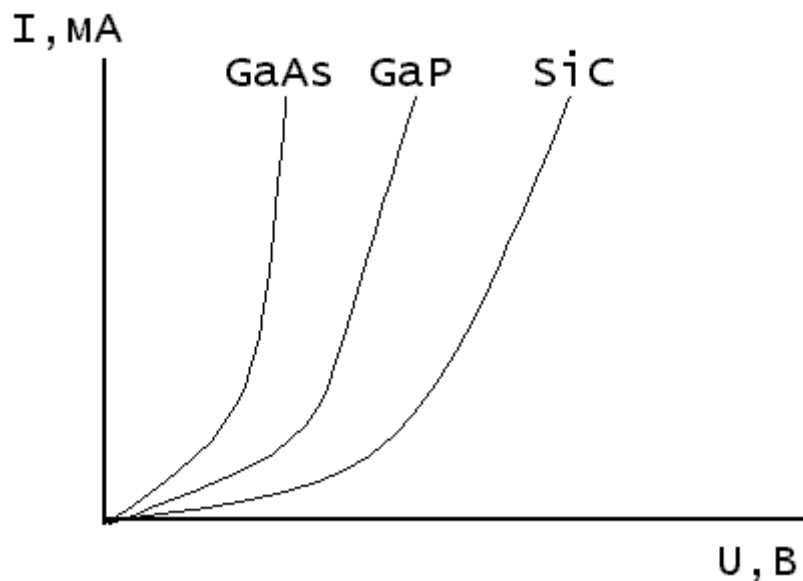


Рисунок 4.2 - Вольтамперна характеристика світлодіода

4.3 Фототранзистор

Фототранзистор – це фотогальванічний приймач випромінювання, фоточутливий елемент якого має структуру транзистора, що забезпечує підсилення сигналів.

Основні параметри:

- Струм у вихідному ланцюзі фототранзистора

$$I_{\phi N} = \left(\frac{L_N}{I} - L_N \right) \cdot I_{\phi} = K_{ice} \cdot I_{\phi}, \quad (4.17)$$

де K_{ice} – коефіцієнт підсилення у схемі зі спільним емітером.

- Інтегральна струмова чутливість фототранзистора з освітлювальною областю бази в K_{ice} раз більше, ніж чутливість „фотодіода”, утворюваного переходом база – колектор.

$$S_{iT} = K_{ice} \cdot S_{iD} \quad (4.18)$$

Як приклад, розглянуто розрахунок бар'єрних опорів транзисторної структури при $m = 12,5 \text{ мкм}$, $\kappa = 1$.

Параметри структури з ізоляцією р – n переходом

$$x_{je} = 2.0 \text{ мкм},$$

$$x_{jn} = 9.0 \text{ мкм},$$

$$x_{jk} = 3.0 \text{ мкм}$$

$$C_{\text{бічне}} = 420 \text{ пФ/мкм}^2,$$

$$C_{\text{бічн}} = C_{gn} = 42 \text{ пФ/мкм}^2,$$

$$C_{ge} = 150 \text{ пФ/мкм}^2,$$

$$C_{gk} = 65 \text{ пФ/мкм}^2,$$

Для топології транзистора емітерна ємність дорівнює:

$$C_{e\delta} = C_{ge} 3m^2(k+2) + C_{\text{бічн}}(10+2k)m x_{je} \quad (4.19)$$

$$C_{e\delta} = 150 \cdot 3(12,5)^2(1+2) + 420(10+2 \cdot 1) \cdot 12,5 \cdot 2,0 = 336937,5 \approx 34 \text{ мкФ}.$$

Ємність колектора має вигляд:

$$C_{k\delta} = C_{eg} \left[7m^2(k+4) + \pi x_{jk} m(11+k) \right] \quad (4.20)$$

$$C_{k\delta} = 65 \left[7(12,5)^2(1+4) + 3,14 \cdot 3 \cdot 12,5(11+1) \right] = 447313,75 \approx 45 \text{ мкФ}.$$

Ємність переходу колектор – підкладка з врахуванням бічної ізолюючого переходу:

$$C_{nk} = C_{gn} \left[7m^2(k+4) + 4(x_{jm} + m^2) + 2m(k+11)(x_{jn} + m) \right] + C_{\text{бічн}} \pi x_{jn} \left[m(k+15) + 4x_{jn} \right] \quad (4.21)$$

$$C_{nk} = 42 \left[7(12,5)^2(1+4) + 4(9+12,5)^2 + 2 \cdot 12,5(1+11)(9+12,5) \right] + 42 \cdot 3,14 \cdot 9,0 \cdot \left[12,5(1+15) + 4 \cdot 9,0 \right] = 578245,5 + 280113,12 = 858358,62 \approx 86 \text{ мФ}$$

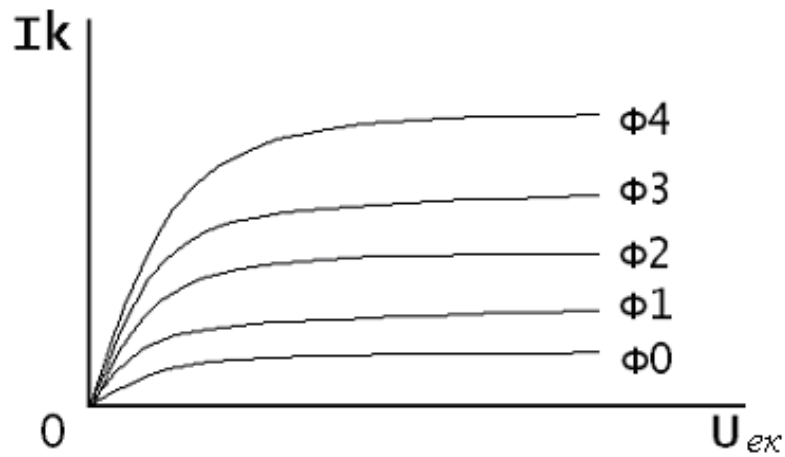


Рисунок 4.3 - Вольтамперна характеристика фототранзистора

4.4 Оптрони

Оптроном називається оптоелектричний пристрій, до якого входить джерело випромінювання та приймач з тим чи іншим видом оптичного та електричного зв'язку між ними, конструктивно об'єднаних і розташованих в одному корпусі.

Розрахунок передавальної характеристики оптрону починається з оцінки спектральної погоджуваності елементів і матеріалів [3-7].

$$\chi_{\text{созл}} = S(\lambda_{\text{изл}}) / S_0 \quad (4.22)$$

$$\chi_{\text{созл}} = 3 \cdot (3) / 10 = 0.9 \quad (4.23)$$

де S, S_0 – світлопропускання середовища і вакууму.

Оцінка коефіцієнта передачі струму K_i :

$$K_i = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}}, \quad (4.24)$$

де $I_{\text{вих}} = 96 \text{ A}$, $I_{\text{вх}} = 20 \text{ A}$.

$$K_i = 96 \text{ A} / 20 \text{ A} = 4,8.$$

Критерієм якості інформаційних оптронів ϵ :

$$Q_{\text{ін}} = K_i / t_{\text{век}} (\text{векл}) \quad (4.25)$$

$$Q_{in} = 4,8 / 15 \text{ мкс} = 3,46$$

Узагальненим критерієм якості управляючого оптрона є:

$$Q_y = P_{ком \max} / P_{вх} \quad (4.26)$$

$$Q_y = 120 \text{ Вт} / 56 \text{ Вт} = 2,14$$

де $P_{ком \max}$ – максимальна потужність комутуючого ланцюга,

$P_{вх}$ – необхідна для керування вхідна потужність.

Для діодних і транзисторних оптронів цей вираз має вигляд:

$$Q_y = K_i U_{вых \max} / U_{вх} \quad (4.27)$$

$$Q_y = 4,8 \cdot 920 \text{ В} / 506 \text{ В} = 8,72$$

Для високошвидкісного переключення:

$$Q'_y = Q_y / t_{вк(викл)} = 8,72 / 15 \text{ мкс} = 0,58. \quad (4.28)$$

Критерій якості енергетичного оптрону – це коефіцієнт корисної дії:

$$Q_e = P_{вих \max} / P_{вв} \quad (4.29)$$

$$Q_e = 145 \text{ Вт} / 68 \text{ Вт} = 2,13$$

де $P_{вих \max}$ – максимальна потужність, яка може бути віддана фотоприймачам при навантаженні.



Рисунок 4.4 - Вольтамперна характеристика оптрона

5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОТРАНЗИСТОРА НА ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ

Якщо n- і p-область переходу виготовлені з різних напівпровідників, то такий перехід називається **гетеропереходом**.

Гетеропереходами можуть бути переходи Ge-Si, Ge-GaAs, GaAs-InP.

Параметри фототранзистора на гетеропереходах [3, 5-8]:

- ВАХ фототранзистора;
- Енергетичні характеристики;
- Спектральні характеристики;
- Пороговий потік Φ_n ;
- Виявляюча здібність D ;
- Коефіцієнт підсилення по фотострумові

$$K_{\text{нос.}\phi} = \frac{1}{1 - h_{21B}}. \quad (5.1)$$

- Вольтова чутливість h_{13}^e
- Тонова чутливість;
- Струмова чутливість з загальним емітером

$$h_{23}^e = \frac{\nu I^e \text{ общ.к.}}{\nu \Phi}. \quad (5.2)$$

Як приклад, розрахунок параметрів фототранзистора проведено на гетеропереходах з вихідними даними:

$$\begin{aligned} \chi_1(\text{GaAs}) &= 4.69 \text{ eV} \\ \chi_2(\text{Ge}) &= 4.78 \text{ eV} \\ \varphi_0 &= 0.09 \text{ eV} \\ p_0 &= 10^{14} \text{ см}^{-3} \\ j_0 &= 10^{-12} \text{ A} \\ n_0 &= 10^{15} \text{ см}^{-3} \end{aligned}$$

Діелектрична постійна:

$$\text{в p-області} \quad \varphi_1 = \frac{2\pi e^2 p_0}{\chi_1} (Lp - x)^2, \quad (5.3)$$

в n-області
$$\varphi_2(x) = \frac{2\pi e^2 n_0}{\chi_2} (x - Ln)^2. \quad (5.4)$$

На межі гетеропереходу при $x=0$ повинна виконуватися умова нерозривності нормальної складової електричної індукції:

$$\chi_1 \left. \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \chi_2 \left. \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (5.5)$$

$\varphi_1(x)$ та $\varphi_2(x)$, $x=0$, знаходимо

$$\varphi_1(0) = \frac{2\pi e^2 p_0}{\chi_1} L^2 p, \quad (5.6)$$

$$\varphi_2(0) = \frac{2\pi e^2 p_0}{\chi_2} L^2 n, \quad (5.7)$$

$$Ln / Lp = p_0 / n_0. \quad (5.8)$$

Повна контактна різниця потенціалів на межі гетеропереходу:

$$\varphi_0 = \varphi_1(0) + \varphi_2(0). \quad (5.9)$$

Знайдемо товщину шарів об'ємного заряду

$$Ln = \sqrt{\frac{\chi_1 \chi_2 p_0 \varphi_0}{2\pi e^2 n_0 (n_0 \chi_2 + p_0 \chi_1)}} = \sqrt{\frac{4,69 \cdot 4,78 \cdot 0,09 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 10^{14} (10^{14} \cdot 4,78 + 10^{15} \cdot 4,69)}} = 0,4 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$$

$$Lp = \sqrt{\frac{\chi_1 \chi_2 p_0 \varphi_0}{2\pi e^2 p_0 (n_0 \chi_2 + p_0 \chi_1)}} = \sqrt{\frac{4,69 \cdot 4,78 \cdot 0,09 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 10^{15} (10^{14} \cdot 4,78 + 10^{15} \cdot 4,69)}} = 0,13 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$$

Розрахуємо товщину об'ємного заряду

$$L = L_n + L_p = 0,53 \cdot 10^{-7} \text{ см.} \quad (5.10)$$

ВАХ гетеропереходу

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.11)$$

При $I_0 = \text{const}$, $I = I_0$ – зворотнє зміщення.

При $I_0 \neq \text{const}$, $I = I_0$ – пряме зміщення.

$$I = 10^{-12} \left[\exp\left(\frac{-1,6 \cdot 10^{19} \cdot U}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) - 1 \right] =$$

$$= 10^{-12} \left[\exp(-3,86 \cdot 10^7 \cdot U) - 1 \right]. \quad (5.12)$$

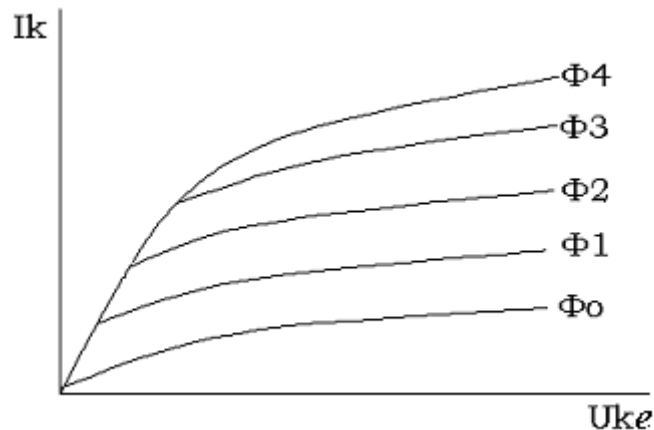


Рисунок 5.1 - Вольтамперна характеристика фототранзистора

6 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЇВ НА ПРИЛАДАХ З ОБ'ЄМНИМ ЕФЕКТОМ

6.1 Генератор на надгратці

Надграткою називається періодична структура, що складається з тонких чередуючих в одному напрямку шарів напівпровідників.

Розглянемо приклад розрахунку їх основних параметрів за вихідними даними:

- GaAs з $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

- енергія іонізації $E_d = (1,43-0,005)eV$
- ефективна густина $E_c - N_c = 4,7 \cdot 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$
- ефективна густина $E_v - N_v = 7 \cdot 10^8 \text{ (см}^{-3}\text{)}$

Визначаємо енергію Фермі для області температур:

$$e^{\frac{-(E_c - E_d)}{kT}} > \frac{N_c}{2N_d}, \quad (6.1)$$

$$E_F = \frac{(E_c + E_d)}{2 - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{qN_c}{N_d}} \quad (6.2)$$

де q - фактор виродження = 2

E_c – енергія електронів у зоні провідності

E_d – енергія іонізації донорів

$$E_F = \frac{1,43 + 1,425}{2} - \frac{1,38 \cdot 10^{23} \cdot 298}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2} \cdot \ln \frac{2 \cdot 4,7 \cdot 10^{17}}{2 \cdot 10^{16}} = 1,378(eV)$$

$$E_c - E_F = 1,43 - 1,478 = 0,052 \text{ (eV)}$$

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 / 1,608 \cdot 10^{-19} = 0,025 \text{ (eV)}$$

$0,052 > 0,025$ - напівпровідник не вироджений

Для не виродженого напівпровідника

$$n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot N_c \cdot \Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi, \quad (6.3)$$

де $\Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi$ - інтеграл Фермі – Дірака порядку $\frac{1}{2}$.

$$\xi = \frac{E_F - E_c}{kT} = -2,08. \quad (6.4)$$

Знайдемо табличне значення $\Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi$ для $\xi = -2,08$

$$\Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi = 0,12, \quad \text{тоді}$$

$$n = \frac{2}{\sqrt{\Pi}} \cdot 4,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,12 = 0,636 \cdot 10^{17} (\text{см}^{-3}).$$

Далі знаходимо змінювання концентрації електронів із змінням температури

T_s – температура насичення

$$T_s = \frac{E_c - E_d}{K \cdot \ln \cdot \frac{N_c}{N_d}} \quad (6.5)$$

T_i – температура, при якій настає власна провідність

$$T_i = \frac{E_d}{K \cdot \ln \left[\frac{N_c N_v}{(N_d)^2} \right]}. \quad (6.6)$$

Загальна енергія дорівнює:

$$E = \int_{\nu \min}^{\nu \max} h \nu d\nu, \quad (6.7)$$

тоді енергія фотона

$$E_{\phi} = \left(\frac{E}{n_{cp}} \right) \quad (6.8)$$

Частота коливань

$$f = \frac{V_{\partial p}}{L}. \quad (6.9)$$

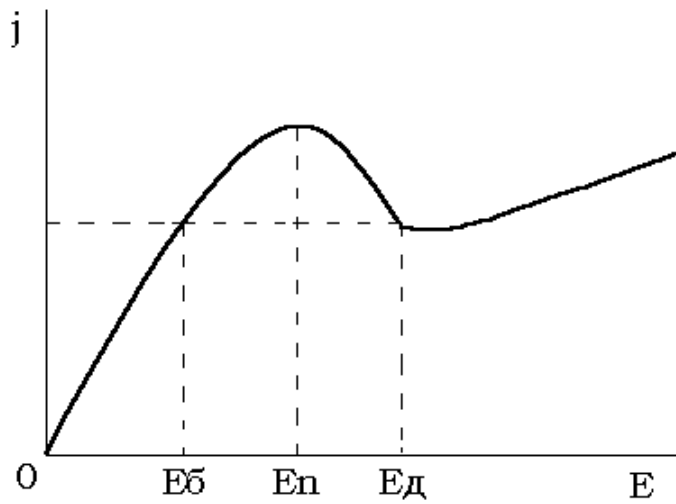


Рисунок 6.1 – Залежність $j = f(E)$ [1, 4-7]

6.2 Розрахунок та проектування плазменного підсилювача

Параметри:

- густина струму;
- робоча частота;
- період коливань;
- час життя носіїв заряду;
- генеруєма потужність.

Густину струму можна розрахувати за формулою:

$$J = q(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)E, \quad (6.10)$$

де q - заряд електрону,
 μ_1 - рухливість „легких” електронів,
 μ_2 - рухливість „важких” електронів,
 n_1, n_2 - концентрація електронів,

$$n_1 + n_2 = n_0, \quad (6.11)$$

E – напруженість.

$$J = 1,60218 \cdot 10^{19} \cdot (2 \cdot 10^{14} \cdot 400 + 1 \cdot 10^{14} \cdot 1500) \cdot 5 = 18,43 \text{mA},$$

$$J = 1,60218 \cdot 10^{19} \cdot (2 \cdot 10^{14} \cdot 400 + 1 \cdot 10^{14} \cdot 1500) \cdot 10 = 36,85 \text{mA}.$$

Робоча частота визначається:

$$f = \nu / L, \quad (6.12)$$

де ν - швидкість насичення,
L - довжина кристалу.

$$f = 60 / 22 = 2,72 \text{ГГц}.$$

Період коливань:

$$T = 1 / f < (2...3), \quad (6.13)$$

де t- робоча частота

$$T = 1 / 2,72 = 0,37.$$

Час життя носіїв заряду

$$\tau' = \frac{(2...3)\varepsilon\varepsilon_0}{qn_0\mu} \quad (6.14)$$

$$\tau' = \frac{2 \cdot 8,85418 \cdot 10^{-12}}{1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot 1,25993 \cdot 10^{-7}} = 8,79548 \cdot 10^{-3} (\text{с}).$$

Генеруєма потужність

$$P = \frac{E^2 \nu^2}{Z f^2}, \quad (6.15)$$

де ν – швидкість насичення;
f – робоча частота;
Z – повний опір

$$P = \frac{60^2 \cdot 60^2}{1 \cdot 10^3 \cdot (2,72)^2} = 175,18 \text{Вт}.$$

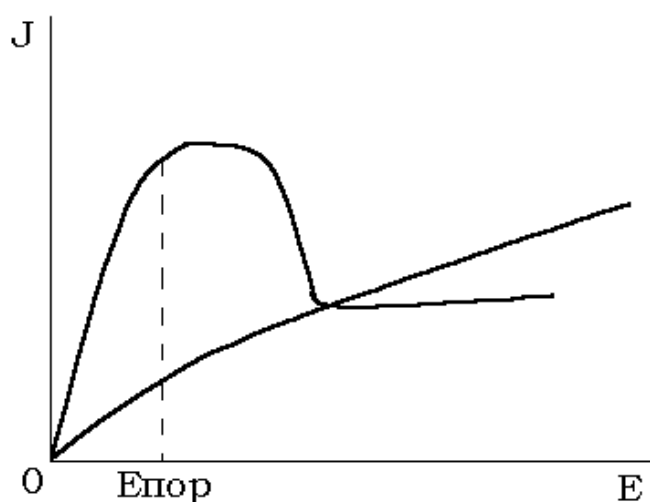


Рисунок 6.2 – Залежність $J = f(E)$ [1, 3-9]

7 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОСХЕМ

7.1 Класифікація резисторів

- за характером змінення опору;
- за способом монтажу;
- за способом захисту;
- за матеріалом резистивного елемента;
- за призначенням.

7.2 Тонкоплівковий резистор

Тонкоплівкові резистори являються елементами гібридних тонкоплівкових мікросхем, а також узгоджувачими елементами в мікрозбірках, де вони присутні у вигляді резистивних матриць (резистивних „збірок”) на окремій мініатюрній підкладці.

Кожна марка резистивних сплавів характеризується заданими значеннями питомого опору R [Ом], допустимою питомою потужністю розсіювання P_0 [Вт/см²], температурним коефіцієнтом опору α [К⁻¹] і коефіцієнтом старіння $g_{ст}$.

Резистори поділяють на дві групи і для кожної групи вибирають свій матеріал [4-6].

Приклад розрахунку резисторів першої групи

1. Визначаємо діапазон p_0 , у якому можна вести розрахунок:

$$0,02R_{\max} < p_0 < R_{\min} \Rightarrow 15 < p_0 < 500 \quad (7.1)$$

2. Відносна температурна похибка:

$$\gamma_{RT} = \alpha_R (T^0 \max C - 20) \quad (7.2)$$

$$\gamma_{RT} = 0,0002(150 - 20) = 0,026$$

3. Відносна похибка старіння:

$$\gamma_{Rcc} = \frac{S \cdot t_{\text{експ}}}{t_{\text{випр}} \cdot 100} = \frac{0,5 \cdot 5000}{1000 \cdot 100} = 0,025, \quad (7.3)$$

де $t_{\text{випр}}$ – час випробування, за який визначено коефіцієнт старіння S ;
 $t_{\text{випр}} = 1000$ годин.

4. Відносна похибка контактування:

$$\gamma_{Rk} = 0,01 - 0,03 \Rightarrow \gamma_{Rk} = 0,01. \quad (7.4)$$

5. Відносна похибка форми:

$$\gamma_{\text{кф}} = \gamma_R - \gamma_{Po} - \gamma_{RT} - \gamma_{Rk} - \gamma_{Rcc} \quad (7.5)$$

$$\gamma_{\text{кф}} = 0,25 - 0,1 - 0,026 - 0,025 - 0,01 = 0,039$$

6. Розрахуємо коефіцієнт форми резистора:

$$K\phi = \frac{R_H}{P_o} = 0,50 / 500 = 1,9 \quad (7.6)$$

7. Знаходимо ширину резистора по міцності:

$$b_{\min p} = \sqrt{\frac{P_H \cdot \rho_0}{P_o \cdot R_H}} \quad (7.7)$$
$$b_{\min p} = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{500}{450}} = 0,0086(\text{мм})$$

8. Визначаємо основний розмір по заданій точності:

$$b_{\min \gamma} = \frac{\Delta b + (\Delta \ell / K\phi)}{\gamma_{K\phi}} \quad (7.8)$$

$$b_{\min \gamma} = \frac{0,02 + 0,02/1,9}{0,039} = 0,78(\text{мм}),$$

де $\Delta \ell = \Delta b = 0,02$.

9. Вибір основного розміру:

$$b > \{b \min p, b \min \gamma\} \Rightarrow b = 0,78 \text{ мм}. \quad (7.9)$$

10. Визначення довжини резисторів:

$$\ell = b \cdot K\phi = 0,78 \cdot 1,9 = 1,48(\text{мм}). \quad (7.10)$$

11. Перевірка проведених розрахунків:

$$R_p = \rho_0 \cdot \frac{\ell}{b} = 500 \cdot \frac{1,48}{0,78} = 0,50 \text{ Ом} \Rightarrow \quad (7.11)$$

розрахунок виконано точно.

7.2 Проектування інтегральних резисторів

Методика розрахунку інтегральних резисторів полягає у наступному:

1. Знаходиться оптимальне значення питомого поверхневого опору

$$R_{\text{ср}} = R_0.$$

$$R_1, R_2, \dots, R_m, (R_0), R_{m+1} \dots R_N$$

$$R_i = R_0 \frac{\ell_i}{a_i} \quad (7.12)$$

Сумарну площину резисторів можна показати сумарним числом квадратів, яке зводиться до \min .

$$S \sum = R_0 \sum_1^m \left(\frac{1}{R_i} \right) + \frac{1}{R_0} \sum_{m+1} R_i \rightarrow \min. \quad (7.13)$$

2. Вибір марки резистивного сплаву визначається за значенням R_0 .
Оптимальне значення $R_{сл}$:

$$R_0 = \sqrt{\frac{\sum_1^N Ri}{\sum_{Ri}^N \left(\frac{1}{Ri}\right)}}. \quad (7.14)$$

3. Потужність P_i , розсіювану резистором, можна визначити:
Для резисторів 1-ї групи:

$$P_i = P_0 \cdot S_i = P_0 a_i \cdot \ell_i = P_0 \frac{R_0}{R_i} \cdot \ell_i^2, \quad (7.15)$$

для резисторів 2-ї групи:

$$P_i = P_0 \cdot S_i = P_0 a_i \ell_i = P_0 \frac{R_i}{R_0} \cdot a_i^2. \quad (7.16)$$

⇒ нові значення критичних розмірів з увагою на потужність розсіювання.

Для резисторів 1-ї групи:

$$\ell_i = \sqrt{\frac{P_i R_i}{P_0 R_0}}. \quad (7.17)$$

для резисторів 2-ї групи:

$$a_i = \sqrt{\frac{P_i R_0}{P_0 R_i}}. \quad (7.18)$$

Температурна похибка

$$\gamma_{t0} = \alpha |t^0_{пред} - t^0_{ком}| \max \quad (7.19)$$

$$\gamma_{тех} = \frac{\Delta \ell}{\ell_i} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha_i} + \gamma_{R_0} \quad (7.20)$$

$$\frac{R_i}{R_0} = \frac{\ell_i}{\alpha_i} \Rightarrow$$

⇒ нові значення критичних розмірів.

(7.21)

Для резисторів 1-ї групи:

$$\ell_i = \frac{\left(\Delta\alpha \cdot \frac{R_i}{R_0} + \Delta\ell \right)}{(\gamma_{техн} - \gamma_{Ro})}.$$
(7.22)

Для резисторів 2-ї групи:

$$\alpha_i = \frac{\left(\Delta\alpha \cdot \frac{R_0}{Ri} + \Delta\ell \right)}{(\gamma_{техн} - \gamma_{Ro})}.$$
(7.23)

4. Розрахунок великих розмірів:

Для резисторів 1-ї групи:

$$\ell_i = \frac{R_i}{R_0} \cdot \alpha_i.$$
(7.24)

Для резисторів 2-ї групи:

$$\alpha_i = \frac{R_0}{R_i} \cdot \ell_i.$$
(7.25)

7.3 Розрахунок конденсаторів для інтегральних схем

Конденсатор на основі р-п-переходу – це напівпровідниковий пристрій, дія якого основана на використанні залежності ємності від зворотної напруги.

Параметри конденсаторів:

- бар'єрна і дифузійна ємність;
- добротність конденсатора;
- температурний коефіцієнт;
- залежність зворотної напруги від ємності р-п-переходу [1, 4-9].

Приклад розрахунку конденсаторів:

1. Товщина збідненого шару:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon U}{qN_a} \right]^{1/2} \quad (7.26)$$

де $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – концентрація акцепторів;
 U - зворотня напруга;

$$\begin{aligned} W &= \left[\frac{2 \cdot 8.849 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 5}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}} \right]^{1/2} = \\ &= \left[\frac{1061.88 \cdot 10^{-12}}{1.6 \cdot 10^{-3}} \right]^{1/2} = 25.72 \cdot 10^{-4} (\text{м}) \end{aligned}$$

Ємність конденсатора з площею обкладинок $A = 129 \text{ мм}^2$.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{W} \quad (7.27)$$

$$C = \frac{1.06 \cdot 10^{-10} \cdot 129 \cdot 10^{-6}}{25.72 \cdot 10^{-4}} = 5.32 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Питома ємність конденсатору з площею р-п-переходу:

$$C_0 = \frac{C}{S}, \quad C_0 = \frac{5.32}{0.25} = 21.28 \text{ Ф} \quad (7.28)\text{і}$$

Добротність конденсатору:

$$Q = \frac{1}{2\pi f C R_n} \quad (7.29)$$

де f - робоча частота,
 R_n – об'ємний опір матеріалу напівпровідника.

$$Q = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 5,32 \cdot 10^{-12} \cdot 30} = \frac{1}{10022,88 \cdot 10^{-6}} = 99,7(\text{Ом}).$$

Температурний коефіцієнт ємності заданого конденсатору:

$$TKE = \frac{1}{3} \left[2TK(\varepsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} TK(\Delta\varphi) \right], \quad (7.30)$$

де $TK(\varepsilon_n) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,
 $TK(\Delta\varphi) \approx -6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,
 $\Delta\varphi_0 = 0,7 \text{ В}$.

$$\begin{aligned} TKE &= \frac{1}{3} \left[2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} - \frac{0,7}{0,7 - 5} \cdot (-6 \cdot 10^{-3}) \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left[4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,103 \cdot (-6 \cdot 10^{-3}) \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left[4 \cdot 10^{-4} - 0,98 \cdot 10^{-3} \right] = -1,007 \end{aligned}$$

Знаходимо залежність ємності р-п-переходу від зворотної напруги:

$$C_U = C_0 \left[\frac{\varphi_K}{(\varphi_K + U)} \right]^{1/n}, \quad (7.31)$$

де C_U – ємність при зворотній напрузі $U = 5 \text{ В}$,
 $C_0 = 21,28 \text{ Ф}$,
 $\varphi_K = 0,7 \text{ В}$ – контактний потенціал типу конденсатора.

$$C_U = 21,28 \cdot 10^{-12} \left[\frac{0,7}{0,7 + 5} \right]^{1/2} = (21,28 \cdot 0,122^{1/2}) = 7,46(\text{nФ}).$$

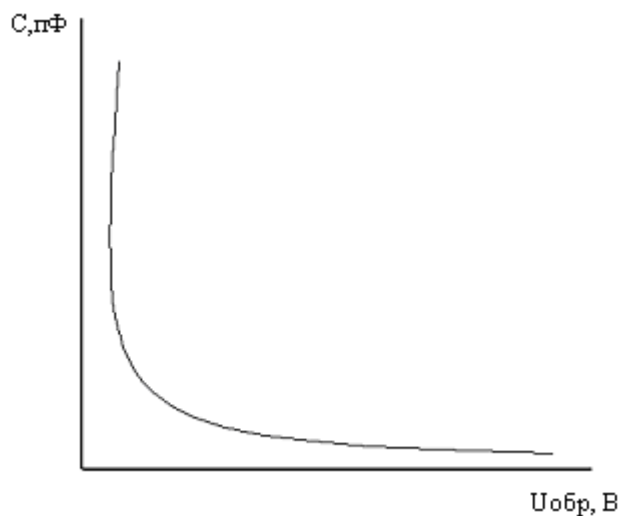


Рисунок 7.1 - ВФХ конденсатору на основі р-п-переходу

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуртів В.А. Твердотільна електроніка. К.: Техносфера, 2017. 408 с.
2. Жеребцов І.П. Основи електроніки. К.: Енергоатом вид., 2015. 128с.
3. Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Твердотільна електроніка: Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни: «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2018. 35с.
- 4 .Ніконова З.А. Твердотільні компоненти мікро – та наноелектроніки : конспект лекцій «Твердотільні компоненти мікро – та наноелектроніки » для студ. спец. 153 «Мікро – та наносистемна техніка». Запоріжжя: ІННІ ЗНУ, 2020. 95с.
- 5 Готра З.Ю. Фізичні основи електронної техніки. Львів: Бескид Біт. , 2017. 55с.
- 6 Баранський П.І. Напівпровідникова електроніка: довідник. Київ :Наукова думка, 2018. 358с.
- 7 Калніболотський Ю.М. Розрахунок та конструювання мікросхем. Київ: Вищ. школа, 2016. 121с.
- 8 Тугов Н.М. Напівпровідникові прилади . К.: Енергія, 1990. 166с.
- 9 Викулін І.М. Фізика напівпровідникових приладів, Харків: Радіо і зв'язок, 1990. 542с.
- 10 Матвійків М.Д. Елементна база електронних апаратів: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2017р. 428с.
- 11.Швець С.Я Твердотільна електроніка: Інтерактивний лабораторний практикум з твердотільної електроніки. Запоріжжя : 2013. 95с.
- 12.Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю., Ніконова А.О. Твердотільна електроніка : Навчальний посібник до курсового проекту з дисципліни: «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2011. 100с.
- 13.Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Твердотільна електроніка: конспект лекцій «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2014. 95с.
14. Гусев В.Г. Електроніка . Київ: Вища школа, 1991.79с.
15. ТеоєховВ.А. Задачник з електронних пристроїв . К.: Енергоатом вид., 1983. 288с.
16. Ляшко М.Н. Задачі та вправи з електроніки. Київ: Вища школа, 1992. 89с.
17. Степаненко І.П. Основи теорії транзисторів. К.: Енергія, 1997. 480с.
18. V.V. Odinsonov, G.Ya. Pavlov. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics. Technology and de-signing in the electronic equipment, 2011. v.3. PP. 41 - 43.
19. Green M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond . Physic, 2012. Vol. E 14. PP. 65 - 70.

Інформаційні ресурси:

1. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: <http://library.znu.edu.ua/>
2. Система електронного забезпечення навчання ЗНУ. URL: <https://moodle.znu.edu.ua/>
3. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/>
4. AnyLogic: імітаційне моделювання для бізнесу URL: <https://www.anylogic.com/>