

I. Контакт Метал – Напівпровідник.

1. Робота виходу та контактна різниця потенціалів.
2. Хід потенціальної енергії в запірному шарі.
3. Товщина області просторового заряду.
4. ВАХ контакту метал-напівпровідник.
 - 4.1 Діодна теорія.
 - 4.2 Дифузійна теорія.
5. Особливості реальних контактів метал-напівпровідник.
 - 5.1 Причини невідповідності «теорія-практика».
 - 5.2 Вплив сил зображення.
6. Вплив опору бази.
7. Ненадбар'єрні механізми протікання струму.
 - 7.1 Тунелювання.
 - 7.2 Генераційно-рекомбінаційний струм.
 - 7.3 Якщо є декілька механізмів протікання струму.
8. Вимірювання неоднорідності домішок.
9. Вплив проміжного шару на фізичні властивості контакту метал-напівпровідник.
10. Вплив неоднорідностей на висоту потенціального бар'єру.

II. р-п перехід.

1. Методи створення р-п переходу. Різкий та плавний р-п перехід.
2. Хід потенціальної енергії в р-п переході.
 - 2.1 Різкий несиметричний р-п перехід.
 - 2.2 Симетричний р-п перехід.
3. Бар'єрна ємність р-п переходу.
4. ВАХ р-п переходу. Формула Шоклі.
5. Явище рекомбінації.
6. ВАХ р-п переходу з широкою базою та великим рівнем інжекції.
7. Коротка база.
8. Перехідні процеси у діоді з р-п переходом.
9. Перехідні процеси при струмах великої густини.
10. Частотна характеристика діода з р-п переходом.
11. Пробій р-п переходу.
 - 11.1 Тепловий пробій.
 - 11.2 Лавинний пробій.
 - 11.3 Тунельний пробій.
 - 11.4 Локальний лавинний пробій.

III. Гетероперехід.

1. Означення, типи.
2. Хід потенціальної енергії в гетеропереході.
3. Ємність гетеропереходу.
4. ВАХ гетеропереходу.
 - 4.1 Анізотипний гетероперехід.
 - 4.2 Ізотипний гетероперехід.

IV. МДН-структура.

1. Означення. Зонні діаграми ідеальної МДН-структури.
2. Залежність заряду ОПЗ напівпровідника МДН-структури від поверхневого потенціалу.
3. Залежність диференціальної ємності напівпровідника від поверхневого потенціалу.
4. Високочастотна ВФХ ідеальної МДН-структури.
5. Низькочастотна ВФХ ідеальної МДН-структури.
6. Вплив різниці робіт виходу та ПЕС на ВЧ ВФХ МДН-структури.
7. Вплив різниці робіт виходу та ПЕС на НЧ ВФХ МДН-структури.
8. Нерівноважна (імпульсна) ВЧ ВФХ МДН-структури.

V. Домашні роботи.

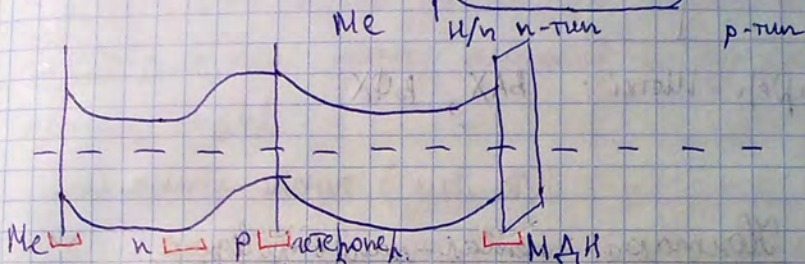
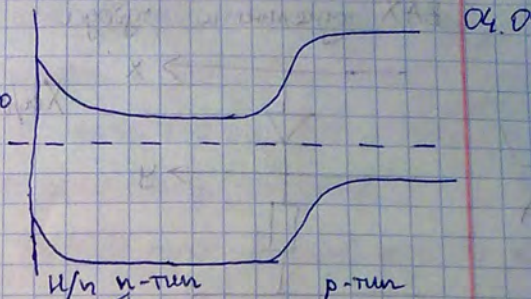
1. Побудувати енергетичні діаграми для зон для контакту метал-напівпровідник при накладанні поля.
2. Для діодної теорії контакту метал-напівпровідник:
 - 2.1 - покласти $j_{sm} = j_{ms}$ та знайти коефіцієнт В.
 - 2.2 - довести, що $\frac{qv_0 n_0 e^{-\varphi_0/kT}}{4} = A^* T^2 e^{-\varphi_b/kT}$.
 - 2.3 - знайти вираз, з якого можна знайти A^*, φ_b .
3. Показати, що якщо є декілька механізмів протікання струму, то $\alpha_1 = q/kT$, а всі інші $\alpha_i < q/kT$.
4. Знайти хід потенціальної енергії для контакту метал-напівпровідник в різних областях. Знайти ω, x_m .
5. Знайти прозорість для трикутного бар'єру в р-п переході.
6. Розглянути плавний р-п перехід, в якому $\rho(x) = qax$, де $a = \frac{d(N_d - N_a)}{dx}$ - градієнт. Отримати вираз для $\omega, \varepsilon(x)$. Побудувати при $\omega_n = \omega_p = \omega/2$. Дістати ємність для плавного р-п переходу.
7. Для р-п переходу побудувати розподіл носіїв у р, п областях. Врахувати, що $pn = n_i^2$.
8. Для р-п переходу нехтуючи залежністю $I_{пр} \sim \text{const} \cdot e^{qV/kT}$ і вважаючи $I = \text{const}$, отримати вираз для V (прямі зміщення) в залежності від T .
9. Знайти ВАХ для плавного р-п переходу ($V_{пр} \sim a^{-m-1/2m+1}$).
10. Знайти ємність для гетеропереходу.

$$n = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

Донори — нейтральні, якщо
іонізов. і

⊕ зарядн., якщо
іонізов.

Для акцепторів навпаки.



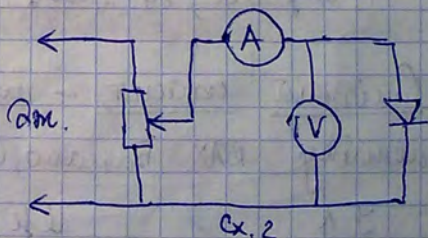
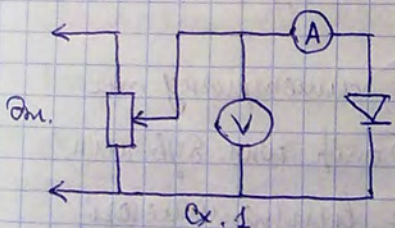
1. контакт Me-н/п

2. p-n перехід

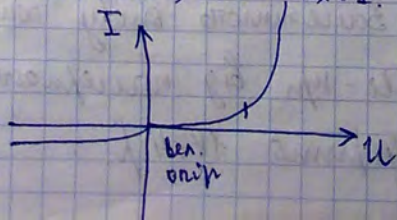
3. гетероперехід

4. МДН структура

базові елементи
н/п приладів

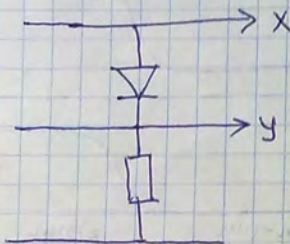


Якщо опір діода малий, то Сх. 2, якщо опір
діода великий, то Сх. 1.



$$R = \frac{U}{I}$$

ВАХ тунельного діода



Характеристика: по x і по y напруж.

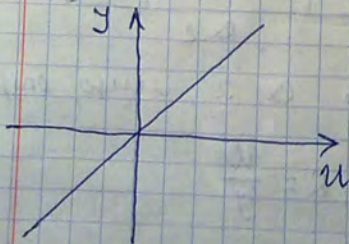
Бар'єр Шоткі: ВАХ, ВФХ

1.09.12.

Контакт метал-напівпровідник

1. Родрик "Контакт м-п/п"
2. Стриха, 82 "Конст. з'єдн. м-п"
3. Діа "Повітряні з'єдн. в п/п"
4. Стриха, 84 "Повітр. з'єдн. в п/п"

Омієвий контакт - має симетричну та лінійну ВАХ. Бачимо, щоб отримати конст. з'єдн. м-п.



Це є випрямлені контакти.

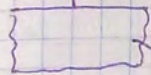
Залежність опору контакту м-п від площі поверхні

було відкрито 1874 р.

1904 р. — на основі мет. вартості н/п христизму
було створено депекторні.

1 Ме

Потім (після 20х рр 20 ст.) його
погали вистіснити н/п.

 н/п Лосев (СРСР) — досліджував кошт. Ме-н/п.

В 1938 р. — н/п. Шоткі висловив основну ідею про
потенц. Бар'єр.

Контакти Моме (див. Зі).

1954 р. — проблеми ауд. під Шаткарівним.

1981 р. — пробл. слабор. н/п.

1975 р. — пробл. наб. проводів і низькошум. конфер.
по Бар'єру Шоткі.

Контакт Ме-н/п використовували в НВЧ.

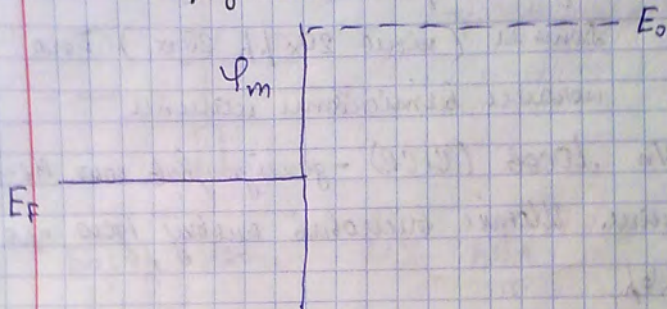
Випр. в апараті. для підвищення шв. ТТЛ

100 л. — баг. переходу відом Шоткі (ТТЛШ).



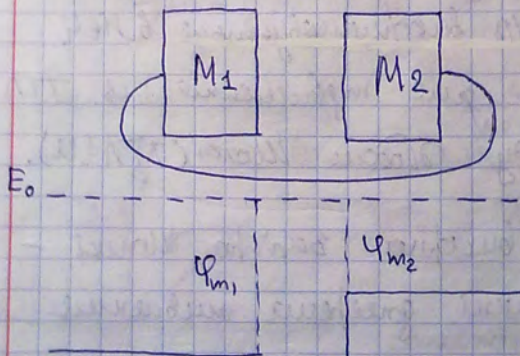
Ще висвіта. Бар'єра Шоткі —
вторинні джерела зовнішн.

Робота виходу на контактних різницях потенціалів.



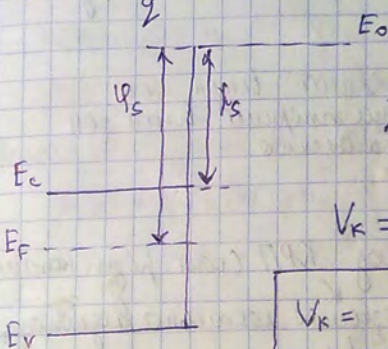
Роб. виходу - це роб. яку потрібно виконати щоб віддашити e з Me на нескінченність.

$$\varphi_m = E_0 - E_F.$$



Контактна різниця потенціалів - це різ. пот. між двома металами, що знах. в безпос. близькості від поверхні Me , але не в них.

$$V_k = \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{q}$$



χ_s - электронная отрицательность (зависит от работы выхода)

$\chi_s = \text{const}$ - для кристаллов из одного материала.

$$V_k = \frac{\varphi_{s1} - \varphi_{s2}}{q}$$

$$V_k = \frac{\varphi_m - \varphi_s}{q} - \text{конст. Me-N/P.}$$

Полн: $\mathcal{E}_d = \frac{V_k}{d}$

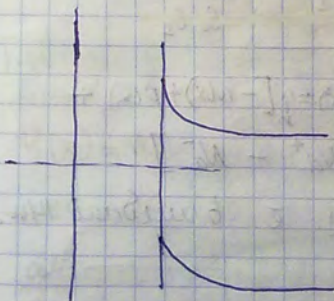
$$\mathcal{E}_s^0 = \mathcal{E}_d \frac{\mathcal{E}_d}{\mathcal{E}_s}$$

- вычисляет з пер. вост. индукц.

(вычисл. поле в кн. слое поверхн.)

ал. поле: $\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 \mathcal{E}_2$

Полн проливает в кн. - упрощается вычисл. зом.



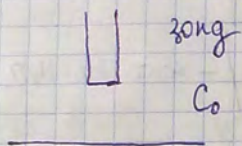
кн. конст. вост. индукц. вычисл. зом.

$\varphi_m > \varphi_s$ - zone вытекающего барьера

$\varphi_m < \varphi_s$ - вклев

$\varphi_m > \varphi_s$ для n-типа - запирает вышнюю зону
 $\varphi_m < \varphi_s$ - активирует вышнюю зону (заваление)

Для p-типа - наоборот.



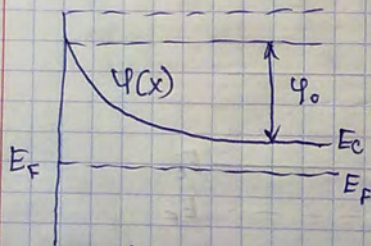
Метод КРП (конт. физ. потенциал).
 Позволяет локально выделить физ. потенциал.

А/з:
 обдув.
 графики.

Ход потенциальной энергии в запирающей зоне

Me - n тип.

Р-но Шоттского:



$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{q \rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s}$$

$$\rho(x) = q[-n(x) + p(x) + N_d^+ - N_a^-]$$

$N_d^+ = N_d = N_0$ - конст. τ в вышней зоне

$$n(x) = N_0 e^{-\varphi(x)/kT}$$

$$p(x) = p_0 e^{+\varphi(x)/kT}$$

$$N_d = N_0 \gg n(0) \quad (\text{на границе})$$

$$\varphi_0 \gg 2,3 kT$$

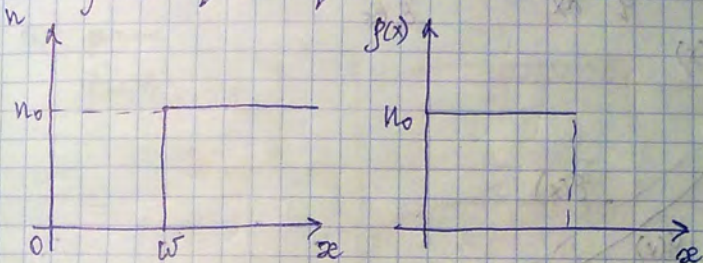
$$n(0) = 0,1 n_0$$

$$p(x) < n_0$$

$$\varphi(x) < \Delta E_g - 2(E_c - E_F) - kT \ln \frac{N_c}{N_v}$$

Если из 1 условия следовать, то:

$$p(x) = q N_d^+ = q n_0$$



$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{q^2 n_0}{\epsilon_0 \epsilon_s}$$

Граничные условия: $\varphi(w) = 0$

$$\left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=w} = 0$$

Реш. упр. у
выше:

$$\varphi(0) = \varphi_0$$

$$\varphi(x) = A(w-x)^2 + B(w-x) + C$$

$$x = w \quad 0 = 0 + 0 + C \Rightarrow C = 0$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = -2A(w-x) - B$$

$$x = w \Rightarrow B = 0$$

$$\varphi(x) = A(w-x)^2$$

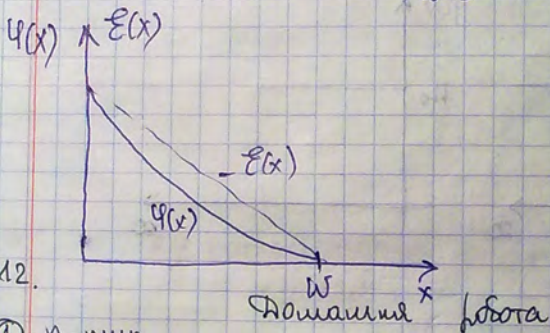
$$\varphi(0) = Aw^2 = \varphi_0 \Rightarrow A = \frac{\varphi_0}{w^2}$$

$$\varphi(x) = \varphi_0 \left(1 - \frac{x}{w}\right)^2$$

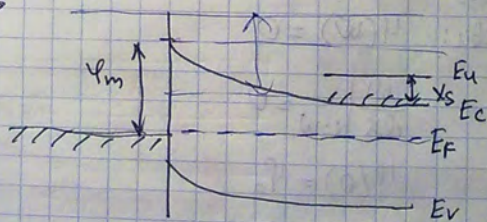
$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = 2A = \frac{q^2 n_0}{\epsilon_0 \epsilon_s} \Rightarrow A = \frac{q^2 n_0}{2\epsilon_0 \epsilon_s}$$

$$\boxed{\varphi(x) = \frac{q^2 n_0}{2\epsilon_0 \epsilon_s} (W-x)^2}$$

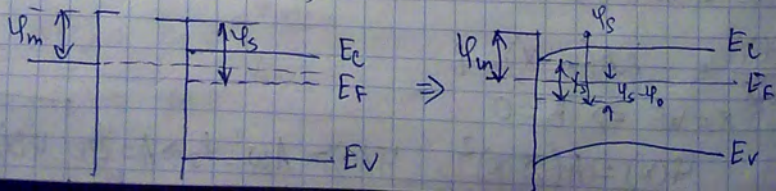
$$\mathcal{E}(x) = \frac{1}{q} \frac{d\varphi}{dx} = - \frac{q n_0}{\epsilon_0 \epsilon_s} (W-x)$$



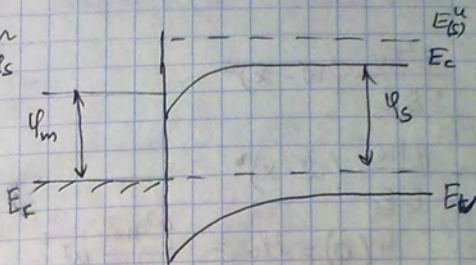
① n-тип $\varphi_m > \varphi_s$



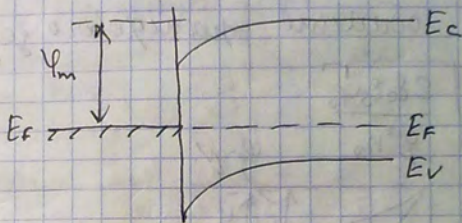
② n-тип ($\varphi_m < \varphi_s$)



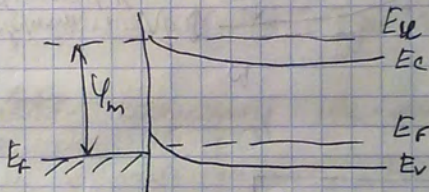
- ② n-mum
 $\psi_m < \psi_s$



- ③ p-mum
 $\psi_m < \psi_s$



- ④ p-mum
 $\psi_m > \psi_s$



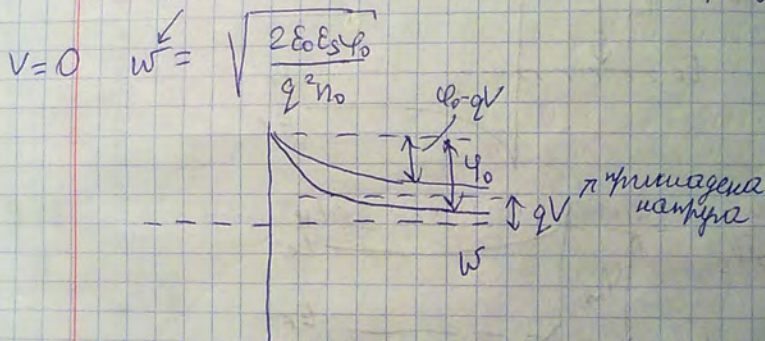
18.9.12.

$$\psi(x) = \frac{q^2 n_0}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} (w-x)^2$$

$$\xi(x) = -\frac{q n_0}{\epsilon_0 \epsilon_s} (w-x)$$

При $x=0$ $\psi(0) = \psi_0 = \frac{q^2 n_0}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} w^2$

Глубина области пространственного заряда:



$V \neq 0$ $w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s (\psi_0 - qV)}{q^2 n_0}}$

Заряд области пространственного заряда:

$$Q = q n_0 S w$$

Емкость:

$$C = \frac{dQ}{dV} = q n_0 S \frac{dw}{dV} = \frac{q n_0 S}{2w} \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s}{q^2 n_0} (-q) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{w}$$

Заряд Josephson по всей области. Значит заряд

миллионы на сантиметр \Rightarrow формула для расчета конденсатора

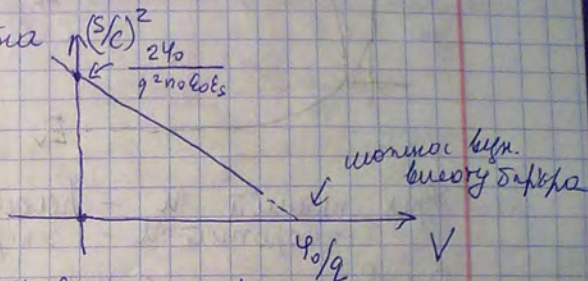
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{d}$$

$$\frac{W}{\epsilon_0 \epsilon_s} = \frac{S}{C} \quad \frac{W^2}{(\epsilon_0 \epsilon_s)^2} = \left(\frac{S}{C}\right)^2 = \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s (\varphi_0 - qV)}{q^2 n_0 (\epsilon_0 \epsilon_s)^2}$$

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = \frac{2(\varphi_0 - qV)}{q^2 n_0 \epsilon_0 \epsilon_s} = \frac{2}{q^2 n_0 \epsilon_0 \epsilon_s} \left(\frac{\varphi_0}{q} - V\right)$$

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = f(V) - \text{аналитическая}$$

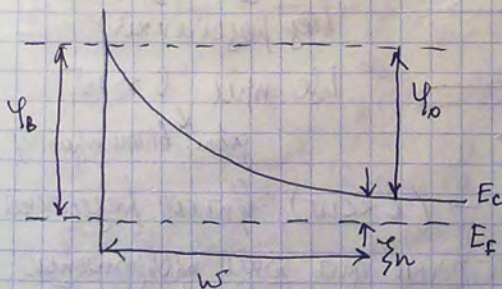
Минимум высоты
барьера контакту
Me-н/н.



но - концентрация инжектируемых носителей

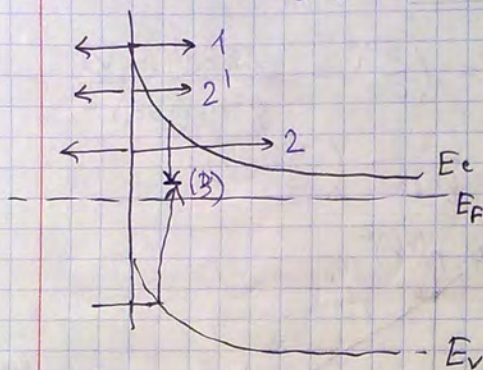
ВАЗ контакту Me-н/н.

Резиновидно изгибный контакт, равновесный / неравновесный



$$\varphi_B = \varphi_0 + \varphi_n$$

(1) Лагранжевский механ. прокаточные ступицы



(2) Тунельный эффект

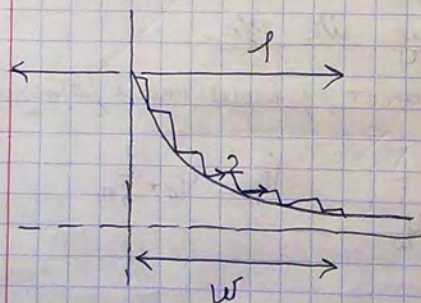
(2) Ферми-Дирака
состояние (на певном
высокой)

(3) Генерационно-
кабинетный
эффект

Взаимному $I=0$,
до + вивага, при
 $u \neq 0$ винков ступи

При переходе u - неслучайн. ступи;
зворотний u - неслучайн. ступи;

Основными в лагранжевский ступи.



1. Диагона теория -

е проходит оба. част.
завису без змичень
(без резонанса)

Use при $l \gg w$
гост. вивн. проводу.

2. Диффузная теор. - ($l \ll w$) вивн. проводу:

нові завсуду проход. болше два зони проводимости.
за рахунок дифузії в гнєбоду.

3. Теорія напруженості електричної дифузії (узагальнена) -
Фархат. мб. невідомості на поверхні.

Хімія медіє (Бені, 1942 р.)

1. $\varphi_0 \gg kT$

2. $l \gg w$

3. аніони не порушують іонізацію в квазінейтральній області;

$$j_{\text{пол.}} = j_{\text{см}} - j_{\text{мс}}$$

\downarrow потік e^- з см. в мст. \downarrow потік e^- з мст. в см.

$$j_{\text{см}} = \frac{q \sqrt{50} n_0}{4} e^{-\frac{\varphi_0}{kT}}$$

при $U=0$

φ_0 - потенціальна швидкість

$$j_{\text{см}} = \frac{q \sqrt{50} n_0}{4} \exp\left(-\frac{\varphi_0 - qV}{kT}\right)$$

$V \neq 0$

$$j_{\text{мс}}(V=0) = \frac{q \sqrt{50} n_0}{4} \exp\left(-\frac{\varphi_0}{kT}\right)$$

$$j=0 \Leftrightarrow j_{\text{мс}} = j_{\text{см}}$$

$$j = j_{\text{см}} - j_{\text{мс}} = \frac{q \sqrt{50} n_0}{4} \cdot e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$$j_{\text{мс}} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right), \quad A^* = \frac{4 \pi m n^* k^2}{h^3} - \text{ефективна площа}$$

Різак Георгій

$$A = \frac{4 \pi m_0 k^2}{h^3} - \text{площа Різак-Горана}$$

$$A = 120 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2 \text{ при } \mu_e \rightarrow \varphi_0$$

$$j_{\text{см}} = B \exp\left(-\frac{\varphi_0 - qV}{kT}\right)$$

Тоді $V=0 \quad j_{\text{мс}} = j_{\text{см}} \Rightarrow B = ?$ і аніонна швидкість.

$$j = A^* T^2 e^{-\varphi_B/kT} (e^{qV/kT} - 1)$$

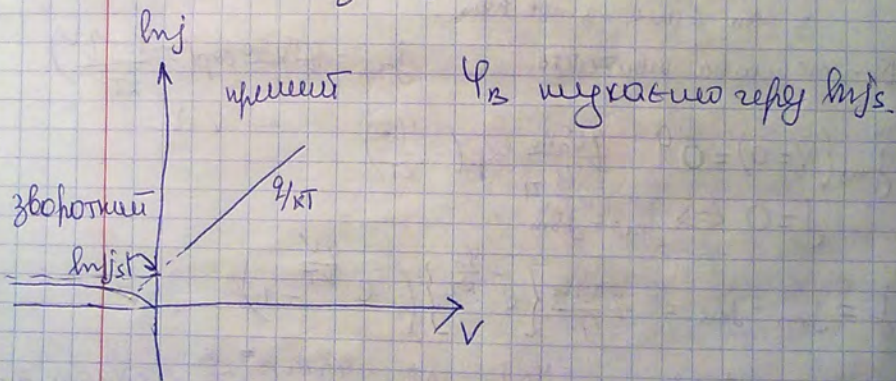
$$j = j_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) ; j_s = \frac{q A^* n_0 e^{-\varphi_B/kT}}{4} =$$

ДЗ:
показать
что j_s —
постоянная

$$= A^* T^2 \exp(-\frac{\varphi_B}{kT}) - \text{константа}$$

для $V \gg \frac{kT}{q}$: $j = j_s \exp(\frac{qV}{kT})$

$$V < 0 \quad |V| > \frac{kT}{q} \quad j = j_s$$



Анализ графика теорема (Шоттки, 1938 г.)

$$j_s(T) \quad \ln j_s = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

Выводимое, что $\varphi_B \gg kT$; доб. в. $\ln j_s$ $\propto 1/T$.

— $n(0)$ и $n(w)$ — значения на границах.

$$n(0) = n_0 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right) = \text{const при симметрии V.}$$

— вычисление $n(x)$;

$$n = N_0 \exp\left(-\frac{E_0 - EF}{kT}\right)$$

$$n > 10^{19} \text{ г/см}^3 \text{ — вычисление.}$$

Важно учитывать δ и μ — коэффициенты.

$$j = qn(x)\mu E(x) + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$\frac{jn}{D_n} = \frac{q}{kT} - \text{const.}$$

$$E(x) = \frac{1}{q} \frac{d\phi}{dx}$$

$$\frac{j}{qD_n} = n(x) \frac{q}{kT} E(x) + \frac{dn}{dx} = \frac{n(x)}{kT} \frac{d\phi}{dx} + \frac{dn}{dx}$$

$$n(0) = n_0 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right) + f(I)$$

$$n(w) = n_0$$

$$n(x) = C e^{-\phi(x)/kT}$$

$$\text{if } j=0 \quad \frac{n(x)}{kT} \frac{d\phi}{dx} + \frac{dn}{dx} = 0$$

$$\text{if } j \neq 0 \quad n(x) = \dots$$

24.09.12.

Домашнее задание

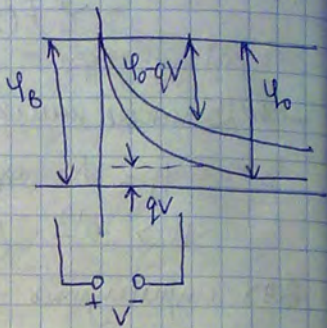
$$① \quad j_{ms} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right)$$

$$j_{sm} = B \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_B - qV}{kT}\right)$$

Условию $V=0 \rightarrow |j_{sm}| = |j_{ms}|$

$$\Rightarrow B = A^* T^2 \Rightarrow j = A^* T^2 \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right);$$



$$② \quad \text{Докажем, что: } \frac{q \varphi_0 n_0}{4} e^{-\varphi_0/kT} = A^* T^2 e^{-\varphi_B/kT}$$

$$A^* = \frac{4\pi m_n^* k^2}{h^3} \cdot q \cdot \quad \varphi_0^2 = \frac{8kT}{\pi m^*}$$

$$n_0 = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\mu}{kT}\right)$$

$$\varphi_0 = \varphi_B - \mu$$

$$\Rightarrow \frac{q}{4} \cdot 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/kT} \cdot \left(\frac{8kT}{\pi m^*} \right)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_0}{kT}\right) =$$

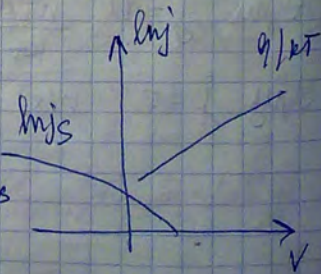
$$= \frac{4\pi m^* k^2}{h^3} T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right).$$

$$③ \quad j = j_s \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right)$$

$$j_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right)$$

$$\ln j_s = \ln A^* + 2 \ln T - \frac{1}{kT} \varphi_B$$

$$\ln \frac{j_s}{T^2} = \ln A^* - \frac{\varphi_B}{kT}.$$



25.09.12.

$$\frac{j}{q\mathcal{D}_n} = \frac{n}{kT} \frac{d\varphi}{dx} + \frac{dn}{dx} \quad (\text{уравнение})$$

$$j=0 \quad \frac{n}{kT} \frac{d\varphi}{dx} + \frac{dn}{dx} = 0 \Rightarrow n(x) = C \cdot e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}}$$

$$j \neq 0 \quad n(x) = C(x) \cdot e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}}$$

Подставим в (*) и получим:

$$\frac{j}{q\mathcal{D}_n} = \frac{C(x) \cdot \exp(-\frac{\varphi(x)}{kT})}{kT} \frac{d\varphi}{dx} + C'(x) e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}} - \frac{\varphi'(x)}{kT} C(x) e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}}$$

$$\frac{j}{q\mathcal{D}_n} = \frac{dC(x)}{dx} e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}} \Rightarrow dC(x) = \frac{j}{q\mathcal{D}_n} e^{\frac{\varphi(x)}{kT}} dx$$

$$C(w) - C(x) = \frac{j}{q\mathcal{D}_n} \int_x^w \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) dx \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C(x) = C(w) - \frac{j}{q\mathcal{D}_n} \int_x^w \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) dx$$

$$x=w \quad n(w) = n_0 = C(w);$$

$$C(x) = \left(n_0 - \frac{j}{q\mathcal{D}_n} \int_x^w \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) dx \right);$$

$$n(x) = C(x) e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}} = \left(n_0 - \frac{j}{q\mathcal{D}_n} \int_x^w \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) dx \right) e^{-\frac{\varphi_0 - qV}{kT}}$$

$$x=0 \quad n(x) = n_0 \exp(-\frac{\varphi_0}{kT})$$

$$n_0 e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} = \left(n_0 - \frac{j}{q\mathcal{D}_n} \int_0^w \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) dx \right) e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} \cdot e^{\frac{qV}{kT}}$$

$$n_0 \left(1 - e^{-\frac{qV}{kT}} \right) = \frac{j}{q\mathcal{D}_n} \int_0^w \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) dx$$

$$j = q n_0 n_0 \frac{1 - \exp(-qV/kT)}{\int_0^W \exp(\frac{\varphi(x)}{kT}) dx}$$

$$\int_0^W e^{\frac{\varphi(x)}{kT}} dx = \int_{\varphi_0 - qV}^0 e^{\frac{\varphi(x)}{kT}} \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^{-1} d\varphi \approx \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)_{x=0}^{-1} \int_{\varphi_0 - qV}^0 e^{\frac{\varphi(x)}{kT}} d\varphi =$$

$$\left[\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{d\varphi}{dx} \right] = \frac{kT}{q\mathcal{E}_0} \left(1 - e^{\frac{\varphi_0 - qV}{kT}} \right) \approx - \frac{kT}{q\mathcal{E}_0} e^{\frac{\varphi_0 - qV}{kT}}$$

Отсюда,

$$j = q n_0 n_0 \frac{q\mathcal{E}_0}{kT} e^{-\frac{\varphi_0 - qV}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

$$j = q n_0 \mu_n \mathcal{E}_0 e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

густота
на
нефронт

$$j = q n_0 \mu_n \mathcal{E}_0 e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \Rightarrow j = j_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

где густота $j_s = A^* T^2 e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} = \frac{q n_0 \mu_n \mathcal{E}_0}{4} e^{-\frac{\varphi_0}{kT}}$

$j_s = q n_0 \mu_n \mathcal{E}_0 e^{-\frac{\varphi_0}{kT}}$ (где густота нефронт)

j_s - диффузия носителей

\mathcal{E}_0 - поле на расстоянии

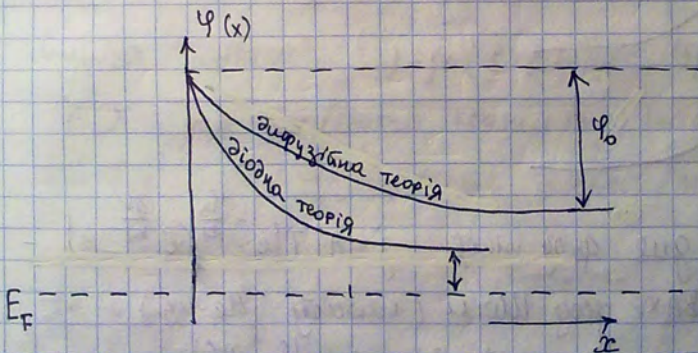
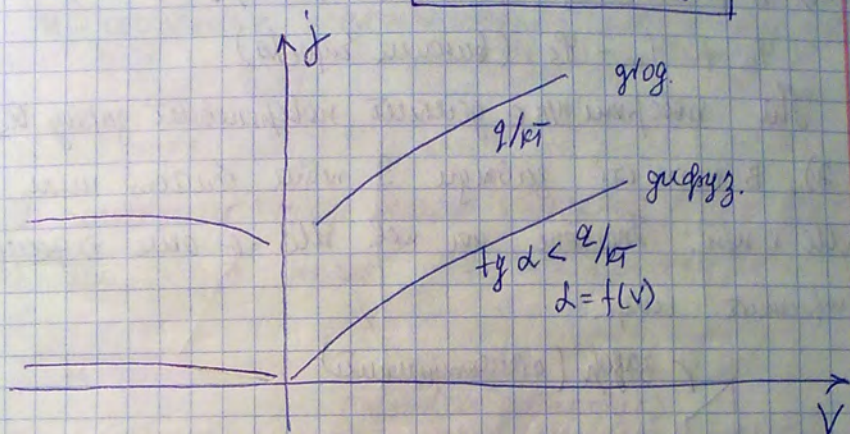
$\mu_n \mathcal{E}_0 = v_{gr}$ - дрейфовая скорость

$$j_{s, \text{group}} = \frac{q n_0 4 \pi m \epsilon_0}{4} e^{-\phi_0 / kT}$$

$$4.5_{\text{group}} < 5_n$$

 \Rightarrow

$$j_{s, \text{group}} < j_{s, \text{group}}$$



Особливості реальних контактів та дюрів.

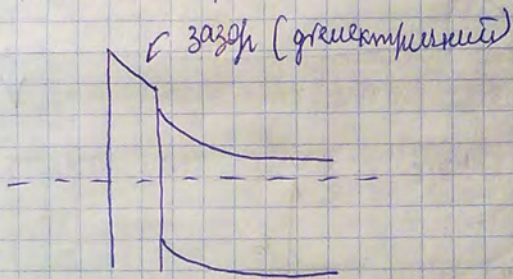
p-n перехід працює на основних носіях;

1). В реальному контакті Me-к/п

$$\varphi_B \neq \varphi_m - \varphi_s \text{ (висока бар'єра)}$$

На поверхні n/p є деякий поверхневий заряд Q_{ss} .

2). В контакті завжди є певна область шліфу Me і к/п. Також при пов. Me є окис \Rightarrow величезна напруга шліфу.



3). В АХ для прог. метр. $j = A^* T^2 e^{-\frac{\varphi_B}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$ - ідеальна ВАХ прог. шліфу (шліфу Me-к/п)

$$qV \gg kT \quad j = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B - qV}{kT}\right)$$
$$\ln j = \ln A^* T^2 - \frac{\varphi_B}{kT} + \frac{qV}{kT}$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{d \ln j}{dV} = \frac{q}{kT}$$

Для реального диода: $f_{g2} < q/kT$ и $f_{g2} = f(V)$.

$$j = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{n kT}\right) - 1 \right) - \text{реальная х-ка.}$$

n - коэффициент идеальности ($n=1$ - для идеального)
 \Rightarrow идео $n \neq f(V)$.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln j}.$$

В реальном диоде идео касательная ($j_{20} = f(V)$).

4). Для диодов Шоттки: $1 < n < 1,04 \div 1,1$

МТДН - ме - талевые диоды. - кпн
(прямой ток)

Смещение контактов: $j = j_s (\exp(\alpha V) - \exp(\alpha^* V))$

ВРХ для реального контакта такой возр/жк.

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \text{ где } \epsilon \text{ - диэлектрик шара } \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}$$

$$\Rightarrow \text{наблюдается } C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

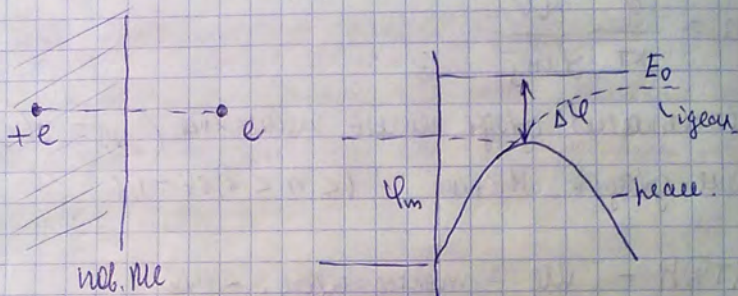
Причины неидеальности реальных диодов: а) - физ. х-к

- 1). наличие асимметрии
- 2). наличие добавочных механизмов протекания тока (генерация - рекомб., терм. - пол. эмиссия)
- 3). неидеальность контактов по механизму и т.д.
- 4). неидеальность материала диода по электрофизическим свойствам

5). нагнание электронов на поверхности. электроны отщипываются.

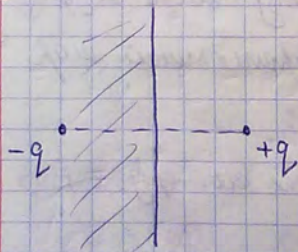
6). электрическая неоднородность;

1. Внешнее поле затравки (неудачно приближено)



Значение работы выхода за пол. поле затравки (косвенный эффект Шоттки)

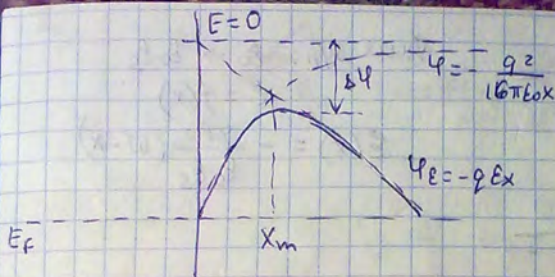
2. 10.12.



Сила притяжения до поверхности:

$$F(x) = - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x^2}$$

$$A = \int_0^x F(x) dx = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 x} = - \varphi_{cs}(x) \text{ работа по перем. з. неск. в м. } x.$$



Якщо ϕ поше на поверхні $E \Rightarrow$

$$\phi_E = -qEx$$

Складна потенці. енергія: $\phi(x) = \phi_{c3} + \phi_E = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} - qEx$

$$\frac{d\phi}{dx} = +\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} - qE$$

$$x = x_m \quad \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=x_m} = 0$$

$$\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x_m} = qEx_m \Rightarrow x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_0 E}}$$

$$\phi(x_m) = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x_m} - qEx_m = -2qEx_m = -2qE \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_0 E}} =$$

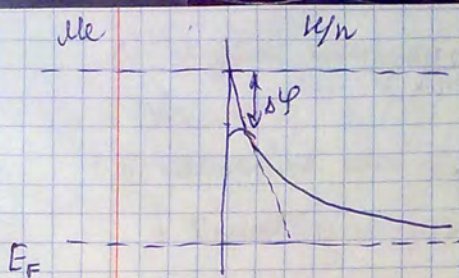
$$= -\sqrt{\frac{q^3 E}{4\pi\epsilon_0}} \quad E = 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}} \Rightarrow x_m = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{16\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^5}} = 6 \text{ нм.}$$

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{q^3 E}{4\pi\epsilon_0}}$$

$$\Delta\phi = 0,12 \text{ В.}$$

— зменшення висоти бар'єру, що призводить до збільшення висхідного струму (ефект Шоткі)

Розглянемо с-мат. ле-кр. Електрон газ. в зоні провідності кр.



Далее $U(x): E_0 \rightarrow E_0 E_s$

$$E = f(x)$$

$$E(x) = -\frac{q n_0}{E_0 E_s} (W - x)$$

Вспомогательное, что на $0 \div x_m: E = E(0)$ (состояние электронов)

$$\begin{aligned} |E(0)| &= \frac{q n_0}{E_0 E_s} W = \sqrt{\frac{2 E_0 E_s (\varphi_0 - qV) q^2 n_0^2}{q^2 n_0 (E_0 E_s)^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{2 n_0 (\varphi_0 - qV)}{E_0 E_s}} \\ \Delta\varphi &= \sqrt{\frac{q^3}{4 \pi E_0 E_s}} \sqrt[4]{\frac{2 n_0 (\varphi_0 - qV)}{E_0 E_s}} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{q^6}{16 \pi^2 E_0^2 E_s^2} \frac{2 n_0 (\varphi_0 - qV)}{E_0 E_s}} = \sqrt[4]{\frac{n_0 q^6}{8 \pi^2 (E_0 E_s)^3}} \sqrt[4]{\varphi_0 - qV} = \\ &= f_{\text{Bul}} (\varphi_0 - qV)^{1/4} \end{aligned}$$

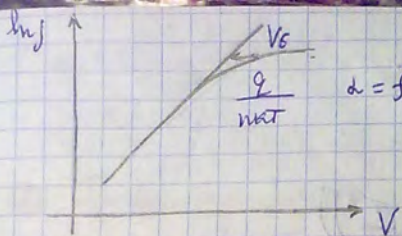
$$j = A^* T^2 \cdot e^{-\frac{\varphi_B - \Delta\varphi}{kT}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$$V > 2,3 kT/q; \quad j_{\text{пр}} \approx A^* T^2 e^{-\frac{\varphi_B}{kT}} e^{\frac{qV + \Delta\varphi}{kT}}$$

$$|V| > 2,3 \frac{kT}{q} \quad j_{\text{зб}} \approx A^* T^2 e^{-\frac{\varphi_B}{kT}} \cdot e^{\frac{\Delta\varphi}{kT}}$$

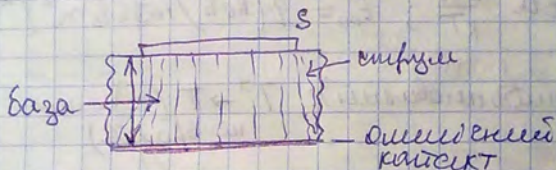
$$j_{\text{пр}} \approx j_s e^{\frac{qV}{kT}}$$

$$n \approx 1,02 \div 1,04$$



$i = f(V)$ - зреш падіння напруги на базі.

2) Вплив опору бази



$\sqrt{s} > l$ - механізм крайових еректів.

$$r_b = \rho \frac{l}{s}$$

$\sqrt{s} < l$ - суттєве розтікання (спадів еректів)

розтікання:

$$r_b = \frac{\rho}{\alpha}$$

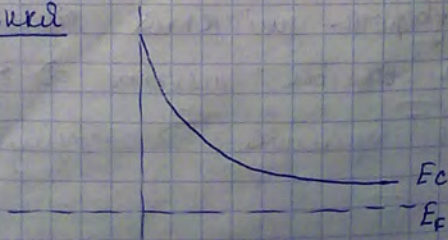
α - розмір контакту.

Коли з'являється напруга V , то зреш з'являється I .

$$V_0 = I \cdot r_b ; \quad I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV - I r_b}{kT}\right) - 1 \right) - \text{враховуємо падіння напруги на опорі бази.}$$

зменшення механізму протікання еректів.

1) Інжекційний



$$j = j_{sm} - j_{ms} \quad \text{Мозгованье}$$

$$j_{sm} = q \int_{E_c}^{\infty} \mathcal{A}(E) U_x dE$$

нулевой энергии: E_c

$$j = j_{sn} \exp\left(\frac{qV}{kT^*} \left(1 - \frac{T^*}{T}\right)\right)$$

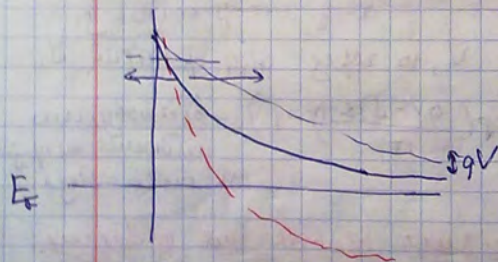
$$j_{sm} = A^* T^2 e^{-\psi_B/kT} \cdot \psi_m(V)$$

$$T^* = \frac{E_{00}}{k} \coth \frac{E_{00}}{kT}; \quad E_{00} = 2 \left(\frac{\hbar^2}{16\pi\epsilon_0\epsilon_s m_n^*} \right)^{1/2}$$

$E_{00} < kT$ (или сроднонований): $T^* \rightarrow T$ (температура не вращив.)

$E_{00} \gg kT$: темпериатура $\sim kT^*$

Температура, через вершины барьера:



Для темпери. напряже qV
можно дать жонс и
температуру, где барьер
температуры.

Для жонс. темпери. область темпери. жонс.
жонс. аме вершина темпери. \Rightarrow больше с
мощность темпери. \Rightarrow жонс. темпери. темпери.

$$d = \frac{d \ln L}{dT} < q/kT$$

$$d = f(V)$$

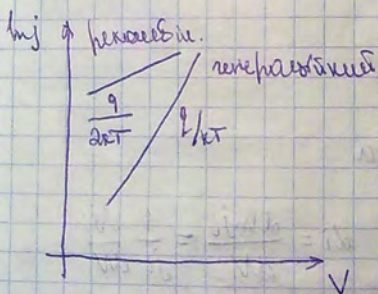
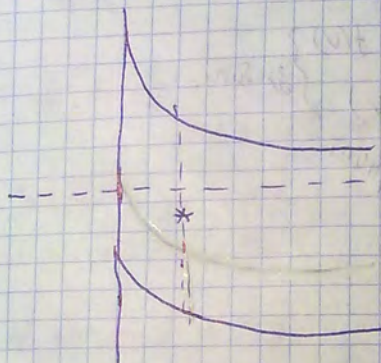
② Температурно-переходный механизм

$$np = n_i^2 \quad (\text{за сост. Шокли-Ридера})$$

$$j_{\text{тек}} \sim n_i q W / 2 L_i \sim (V_0 - qV)^{1/2}$$

$$j_{\text{тек}} = j_{\text{спек}} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right),$$

$$\text{где } j_{\text{спек}} = \frac{q n_i W}{2 L_{\text{рек}}}$$



Всё механизмы описано

так $\frac{q}{kT}$ с вычислено I
при работе же.

③ Принцип мех. описания

$$j = \sum_i j_i$$

$$d = \frac{d \ln j}{dV} = \frac{d \ln \left(\sum_i j_i \right)}{dV} = \frac{1}{\sum_i j_i} \frac{d \sum_i j_i}{dV}$$

$$d_i = \frac{d \ln j_i}{dV} = \frac{1}{j_i} \frac{d j_i}{dV}$$

$$L = \frac{1}{j} \sum_i \frac{dy_i}{dv} = \frac{1}{j} \sum_i dy_i$$

3 yetx d_i нмее $d_1 = \frac{q}{kT}$ (ааггай/фмее нмее.)

а нмее $d_i < \frac{q}{kT}$, $i \neq 1$.

показеи

популеи.
ем.

наг баг.
и нмее.

$$d_1 = \frac{q}{kT}$$

$$d_2 = \frac{q}{2kT}$$

нодуг. $d = f(v)$.

$$\frac{dy}{dv} = f(v)$$

зроби.



Томанеи нмее

$$f = f_1 + f_2$$

$$f_1 = j_{s1} e^{qU/kT}$$

$$f_2 = j_{s2} \cdot e^{qU/2kT}$$

$$dy = \frac{d \ln y_i}{dv} = \frac{1}{j_i} \frac{dy_i}{dv}$$

$$L = \frac{1}{j} \sum_i dy_i$$

$$d_1 = \frac{q}{kT}; \quad d_2 = \frac{q}{2kT}$$

$$L = \frac{q}{kT} j_{s1} e^{qU/kT} + \frac{q}{2kT} j_{s2} e^{qU/2kT}$$

$$d = \frac{q}{KT} \frac{j s_1 e^{\frac{qU}{KT}} + \frac{1}{2} j s_2 e^{\frac{qU}{2KT}}}{j s_1 \exp\left(\frac{qU}{KT}\right) + j s_2 \exp\left(\frac{qU}{2KT}\right)} < \frac{q}{KT}$$

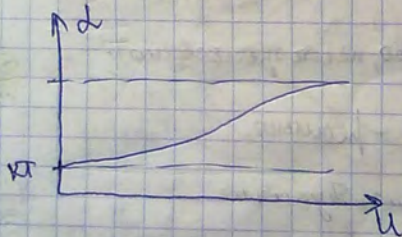
$$d = \frac{q}{KT} \left(1 - \frac{\frac{1}{2} j s_2 \exp\left(\frac{qU}{2KT}\right)}{j s_1 \exp\left(\frac{qU}{KT}\right) + j s_2 \exp\left(\frac{qU}{2KT}\right)} \right) =$$

$$= \frac{q}{KT} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \frac{j s_1 \exp\left(-\frac{qU}{2KT}\right)}{j s_2}} \right);$$

$$j s_1 = j s_2: \quad d = \frac{q}{KT} \left(1 - \frac{1}{2(1 + \exp\left(-\frac{qU}{2KT}\right))} \right)$$

$$U \rightarrow \infty \quad d = \frac{q}{KT}$$

$$U \rightarrow 0 \quad d = \frac{q}{KT} \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + 1 - \frac{qU}{2KT}} \right) = \frac{3q}{4KT}$$

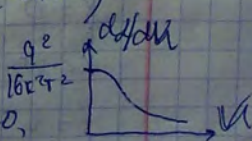


$$\frac{dd}{dU} = \frac{q}{KT} \left(+ \frac{1}{2} \frac{\frac{j s_1}{j s_2} e^{-\frac{qU}{2KT}} \cdot \left(-\frac{q}{2KT}\right)}{\left(1 + \frac{j s_1}{j s_2} e^{-\frac{qU}{2KT}}\right)^2} \right) =$$

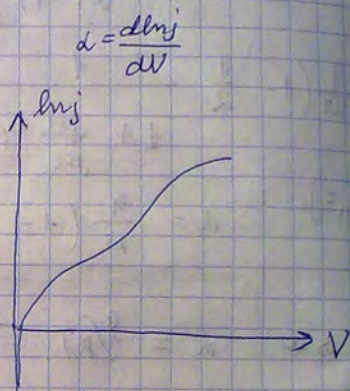
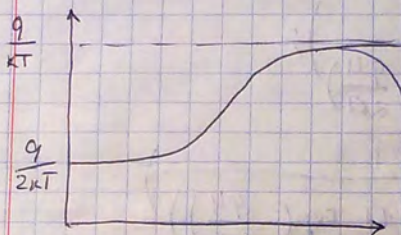
$$= - \frac{q^2}{4KT^2} \frac{e^{-\frac{qU}{2KT}}}{\left(1 + e^{-\frac{qU}{2KT}}\right)^2} =$$

$$= - \frac{q^2}{4KT^2} \frac{1}{e^{\frac{qU}{2KT}} + 2 + e^{-\frac{qU}{2KT}}}$$

$$U \rightarrow 0 \quad d \rightarrow \frac{1}{16} \frac{q^2}{KT^2} \quad U \rightarrow \infty \quad d \rightarrow 0,$$



9.10.12.



$$d = \frac{d \ln j}{dV}$$

Рівняння нестатистичності розподілу зарядів

- інтуїтивно
- технологічно (випадково, неопорядковано);

$$N_a \neq f(x) \quad 0 < x < l$$

$$N_a = f(x) - \text{реально}$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{q^2 N_a(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s} \quad - \text{рівняння Пуассона}$$

Потрібно розв'язувати на проміжках: $0 < x < l$ і $l < x < w$.

$$x = 0 \quad \varphi(0) = \varphi_0$$

$$\left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=w} = 0$$

$$x = w \quad \varphi(w) = 0$$

$$x = l \quad \varphi_1(l) = \varphi_2(l)$$

$$\left. \frac{d\varphi_1}{dx} \right|_{x=l} = \left. \frac{d\varphi_2}{dx} \right|_{x=l}$$

в области $l < x < w$ $\varphi(x) = \frac{q^2 n_0}{2\epsilon_0 \epsilon_s} (w-x)^2$,

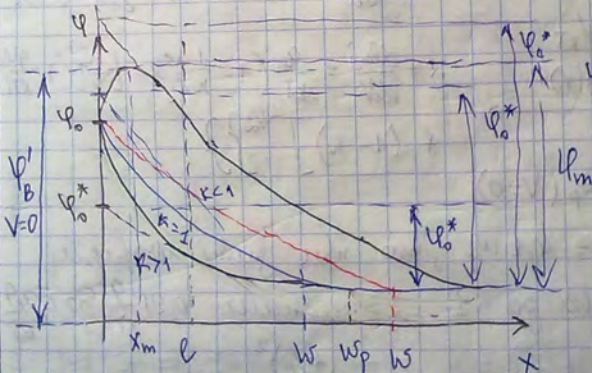
Розглянемо випадок коли $0 < x < l$: $N_A(x) = n_1 = \kappa n_0$
 (розподіл донітних іонів донорно заряджених).
 Якщо в приповерх. обл. в донітних іонів нуль
 крім як в області, то можна записати так само тільки
 $\kappa < 0$.

$$w = \sqrt{w_p^2 - l^2(\kappa - 1)}$$

$$w_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s (\varphi_0 - qV)}{q^2 n_0}}$$

Можна записати, що $w = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s (\varphi_0^* - qV)}{q^2 n_0}}$

де $\varphi_0^* = \varphi_0 + \left(\frac{q^2 n_0}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right) l^2 (1 - \kappa)$ — ефективний потенц.



Можуть бути такі
 $\kappa \neq 1$, що в обл.
 $0 < x < l$

$\varphi(x)$ має максимум:

$$x_m = l + \frac{1}{\kappa} (w - l)$$

$$\varphi_m = \frac{q^2 n_0}{2\epsilon_0 \epsilon_s} (1 - \kappa) (w - l)^2$$

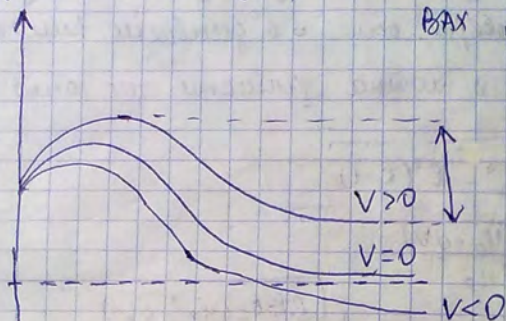
Як це впливатиме на ВАХ та ВФД?

$$J_s = A T \exp\left(-\frac{\varphi_0'}{kT}\right)$$

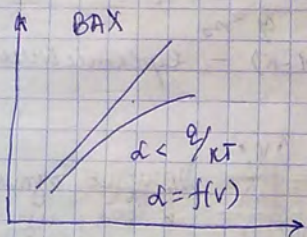
сфери зменшення

$$J_{sm} \sim e$$

Для прикладних прикладів конструкції високоефективна зменшення (хоча підвищення невеличкого і незначущого) підвищення, ніж qV . Для



Важко не знати, що
 $\alpha = f(V)$.



Для зворотного напрямку
 не буде напруги $j_{zv} = f(V)$.

$$\alpha = \frac{d \ln j}{dV} = \frac{q}{kT} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \right) \left\{ 1 - \left[\frac{W_p^2}{e^2} \left(1 - \frac{qV}{kT} \right) + (1 - \kappa) \right]^{-1/2} \right\}$$

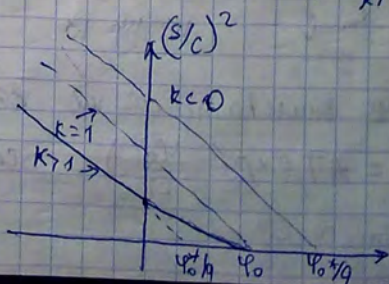
$$W_{op} = W_p(V=0)$$

$\kappa = -100$, $l = 0,1 W_p$, то при зменшенні напруги qV/φ_0 від $0,12$ до 1 α зменшиться від $0,91 \frac{q}{kT}$ до $0,92 \frac{q}{kT}$.

Важко: $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{W}$

$$\left(\frac{S}{C} \right)^2 \sim (\varphi_0^* - qV)$$

$\frac{1}{C^2}$ - приймає



$$\varphi'_{b, \text{гн}} < \varphi_{b, \text{сн}} + \xi_n$$

Знайти прямитного шару на електроформі
висновку контакту Me-germ з
бар'єру Шонкі.

За наближених прямитного шару $\varphi_0 \approx \varphi_m - \varphi_s$

Для прямитного шару, вона отримав на прямитного шару і

$$\text{ОПЗ: } V = V_1 + V_2$$

$(\varphi_0 + qV_2)$ - висота бар'єру для носії в к/п - Me

$(\varphi_0 + qV_1)$ - для носії з Me-germ.

$$j = j_s \left(e^{\frac{qV_2}{kT}} - e^{\frac{qV_1}{kT}} \right) - \text{ВАХ}$$

$$\text{де } j_s = A T^2 e^{-\varphi_0/kT} = \frac{q n_0 v_n}{4} A e^{-\varphi_0/kT}$$

$$j_{\text{пр}} = j_s \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \approx j_s \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

$$j = j_s (e^{\alpha V} - e^{-\alpha V}), \text{ where } \alpha = \frac{d\psi_j}{dV} = \frac{q}{kT} \frac{dV_2}{dV}$$

Будемо повертати про ВАХ на ВЗ.

ВЗ - не дійові заряд в ПС (поверхня всех атомів)

16.10.12.

Знаючи, напруження V до x -го ділянки: $V = V_1 + V_2$

$$C = \frac{d\Phi}{dV} = \frac{d\Phi}{dV_1} \frac{dV_1}{dV} = C_1 \frac{dV_1}{dV}$$

$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}$ - ємність паралельного конденсатора

З іншого боку $C = \frac{d\Phi}{dV} = \frac{d\Phi}{dV_2} \frac{dV_2}{dV} = C_2 \frac{dV_2}{dV}$,

де $C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{w} = \left[w = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_c (\Phi_0 - q\Phi)}{q^2 h_0}} \right]$

$$\frac{C}{C_1} = \frac{dV_1}{dV}$$

$$\frac{C}{C_2} = \frac{dV_2}{dV}$$

$$\frac{C}{C_1} + \frac{C}{C_2} = \frac{dV_1}{dV} + \frac{dV_2}{dV} = 1$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

- нові значення ємності паралельного конденсатора і загальної ємності системи.

$$j = f(V_1, V_2)$$

$$V_1 = f(V)$$

$$V_2 = f(V)$$

$$\left. \begin{matrix} V_1 = f(V) \\ V_2 = f(V) \end{matrix} \right\} \Rightarrow C = \dots$$

$$V \neq 0: \epsilon_0 \epsilon_1 E_1 = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2 = \sigma_s = -q m_i$$

$$E_2^0 = E_2 \Big|_{\substack{x=0 \\ V \neq 0}}$$

$$E_2^{00} = E_2 \Big|_{\substack{x=0 \\ V_2=0}}$$

↓
згідно з
випадком

$$V=0: \epsilon_0 \epsilon_1 E_1^0 - \epsilon_0 \epsilon_2 E_2^{00} = \sigma_s^0 = -q m_i^0$$

Вспомогательные соотношения:

$$\epsilon_0 \epsilon_1 (\epsilon_1 - \epsilon_1^0) - \epsilon_0 \epsilon_2 (\epsilon_2^0 - \epsilon_2^{00}) = -q/m_i - m_i^0$$

$$\epsilon_2^0 = \frac{q n_0}{\epsilon_0 \epsilon_2} \omega, \quad \omega = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_1 (\varphi_0 - q V_2)}{q^2 n_0}}$$

$$\epsilon_2^0 = - \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_2 q^2 n_0^2 (\varphi_0 - q V_2)}{q^2 n_0 (\epsilon_0 \epsilon_2)^2}} = - \sqrt{\frac{2 n_0}{\epsilon_0 \epsilon_2} (\varphi_0 - q V_2)}$$

$$\epsilon_2^{00} = - \sqrt{\frac{2 n_0 \varphi_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}}$$

$\epsilon \left[\frac{R}{u} \right]$ - коэффициент

ϵ_1 - первое значение / возмущение

$$\frac{V_1}{d} = \epsilon_1 - \epsilon_1^0$$

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_1 V_1}{d} - \epsilon_0 \epsilon_2 \left(\sqrt{\frac{2 n_0 \varphi_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}} - \sqrt{\frac{2 n_0 (\varphi_0 - q V_2)}{\epsilon_0 \epsilon_2}} \right) = -q (m_i - m_i^0)$$

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_1 V_1}{d} - \epsilon_0 \epsilon_2 \sqrt{\frac{2 n_0 \varphi_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q V_2}{\varphi_0}} \right) = -q (m_i - m_i^0) \Rightarrow$$

$$V_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{\epsilon_0 \epsilon_1} d \sqrt{\frac{2 n_0 \varphi_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q V_2}{\varphi_0}} \right) - \frac{q d}{\epsilon_0 \epsilon_1} (m_i - m_i^0)$$

$$V_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 d}{\epsilon_0 \epsilon_1} \sqrt{\frac{2 n_0 \varphi_0^2 \cdot 2 q^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_2 \varphi_0 q^2}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q V_2}{\varphi_0}} \right) - \frac{q d}{\epsilon_0 \epsilon_1} (m_i - m_i^0)$$

$$V_1 = \frac{2 \epsilon_2 d \varphi_0}{\epsilon_1 q \omega} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q V_2}{\varphi_0}} \right) - \frac{q d}{\epsilon_0 \epsilon_1} (m_i - m_i^0)$$

$$V_1 = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_1} \sqrt{2 n_0 \epsilon_0 \epsilon_2 \varphi_0} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q V_2}{\varphi_0}} \right) - V_1^i, \text{ где } V_1^i = \frac{q d}{\epsilon_0 \epsilon_1} (m_i - m_i^0)$$

$$V_2 = a_n \sqrt{\varphi_0} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q V_2}{\varphi_0}} \right) - V_1^i$$

$$\partial a_n = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_1} \sqrt{2 n_0 \epsilon_0 \epsilon_2}$$

$$(V_1 + V_1^i) = a_m \sqrt{\varphi_0} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2(V - V_1)}{\varphi_0}} \right)$$

$$1 - \sqrt{1 - \frac{2(V - V_1)}{\varphi_0}} = \frac{V_1 + V_1^i}{a_m \sqrt{\varphi_0}}$$

$$\sqrt{1 - \frac{2(V - V_1)}{\varphi_0}} = 1 - \frac{V_1 + V_1^i}{a_m \sqrt{\varphi_0}} \quad (\text{magnesium 6 keVdham})$$

$$1 - \frac{2(V - V_1)}{\varphi_0} = 1 - 2 \frac{V_1 + V_1^i}{a_m \sqrt{\varphi_0}} + \frac{(V_1 + V_1^i)^2}{a_m^2 \varphi_0}$$

$$\frac{(V_1 + V_1^i)^2}{a_m^2 \varphi_0} - 2 \frac{V_1 + V_1^i}{a_m \sqrt{\varphi_0}} = - \frac{2(V - V_1)}{\varphi_0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{V_1}} = -V_1^i + \frac{a_m^2 q}{2} + a_m \sqrt{\varphi_0} - \sqrt{\left(\frac{a_m^2 q}{2} + a_m \sqrt{\varphi_0} \right)^2 - a_m^2 q (V + V_1^i)}$$

$$\rightarrow \underline{\underline{V_2}} = V - V_1 = V + V_1^i - \frac{a_m^2 q}{2} - a_m \sqrt{\varphi_0} + \sqrt{\left(\frac{a_m^2 q}{2} + a_m \sqrt{\varphi_0} \right)^2 - a_m^2 q (V + V_1^i)}$$

$$\rightarrow \underline{\underline{V_1^i}} = \frac{q d}{\epsilon \epsilon_0} (m_i - m_i^0)$$

$$C = \frac{G C_1}{G_1 + C_2} \quad C_2 = \frac{\epsilon \epsilon_2 S}{w}, \quad w = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_2 (\varphi_0 - q V_2)}{q^2 \varphi_0}}$$

$$\rightarrow C = \frac{S \sqrt{2 \epsilon \epsilon_2 \eta_0 / 2}}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2} a_m}{2} + \sqrt{\frac{\varphi_0}{q}} \right)^2 - (V - V_1^i)}}$$

$V_1^i = 0$ (необходимые условия не являются достаточными)

$$\frac{dV_1^i}{dV_1} = \frac{dq}{\epsilon_0 \epsilon_1} \frac{d\epsilon_1}{dV_1} \quad \frac{d\epsilon_1}{dV_1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{dq} \frac{dV_1^i}{dV_1}$$

$$V_2 = \frac{\varphi_0}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_2^0} \right)^{-2} \left[\left(\frac{1}{\epsilon_2^0} \right)^{-2} - \left(\frac{1}{\epsilon_2^0} \right)^2 \right] = \frac{\varphi_0}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_0} - \frac{1}{\epsilon_1} \right)^{-2} \left(\frac{1}{\epsilon_0} - \frac{1}{\epsilon_2} \right) \times \left(\frac{1}{\epsilon_0} + \frac{1}{\epsilon_2} - \frac{2}{\epsilon_1} \right)$$

Далее задано $C = f(V)$; $C_1, C_0 \Rightarrow V_2 = \dots$

Вывод неопределенности всему потенциальному

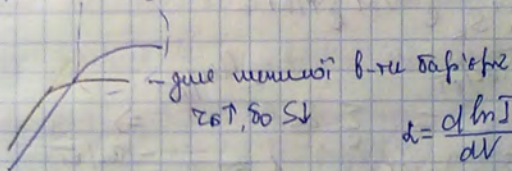
Секция на БАЗ.

$$I = A T^2 S e^{-q\varphi/kT} \left(e^{q(V - I R_0)/kT} - 1 \right)$$

$\ln I$

Вывод анализа

Получение формулы:

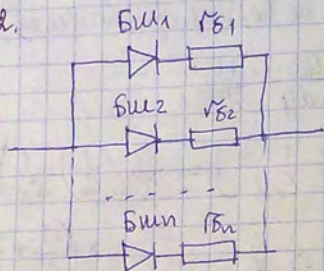


$\epsilon_0 \uparrow, \epsilon_0 \downarrow$

$$\alpha = \frac{d \ln I}{dV} < \frac{q}{kT}$$

$$\alpha = f(V)$$

23.10.12.



$$\alpha = \frac{d \ln I}{dV} = f(V), \quad \alpha < \frac{q}{kT}$$

$$I = \sum_k I_k = \sum_k A T^2 S_k e^{-\frac{\varphi_{Bk}}{kT}} \left(e^{\frac{q(V - I R_{Bk})}{kT}} - 1 \right)$$

$$I = A T^2 S e^{-\frac{\bar{\varphi}_B}{kT}} e^{\frac{qV}{kT}} \quad (\text{при малых напряжениях})$$

$$\sum_k A T^2 S_k e^{-\frac{\varphi_{Bk}}{kT}} e^{\frac{qV}{kT}}$$

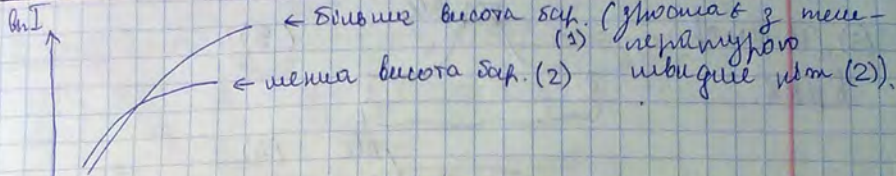
$$S e^{-\frac{\bar{\varphi}_B}{kT}} = \sum_k S_k e^{-\frac{\varphi_{Bk}}{kT}}$$

$$\Rightarrow \bar{\varphi}_B = kT \ln \frac{1}{S} \sum_k S_k e^{-\frac{\varphi_{Bk}}{kT}}$$

$$C = \sum_k C_k, \quad C_k = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S_k}{W_k}, \quad W_k = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s (\varphi_{Bk} - qV)}{q^2 n_0}}$$

Вывод: неоднородности по глубине пара-
метры.

Вывод: 2х типично 2 различия барьеров



для константи $\psi_b \uparrow \Rightarrow n \downarrow \psi_b \propto n$ значе

$$I = AT^2 S e^{-\psi_b / kT} (e^{qV/nkT} - 1), \quad \psi_{bn} = \psi_b / n.$$

і зменшуватися за рахунок терміональної анімі.

Оскільки виважене невідношення між вваганням крафти ефекти.

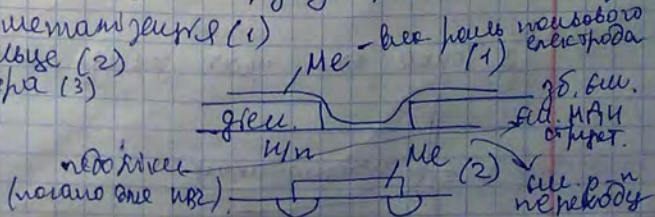
Із оди контакти обмеженої площі, то пох периметру може буде більший ніж в цілості контакту.

\Rightarrow на периферії може бути терміональна анімі, а по площі мере надбавляється ширше.

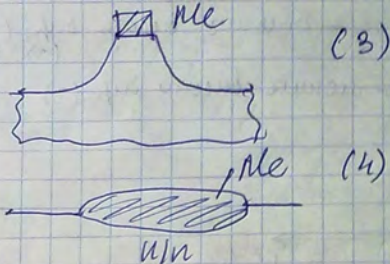
Ширше збільши зворотних і менших прямих напругах. Особливо уртаве зростання для зворотних характеристика. Якщо виміти мере. риходів можна виміряти крафтові ефекти.

І реальна методів для ширину крафтового виміру:

- периметр метамізенту (1)
- охоронне кільце (2)
- медіоцифрування (3)
- анімі (4)



(3), (4) вехов
в КВЗ.

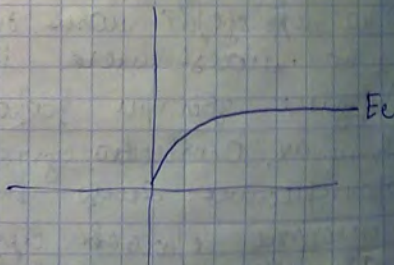
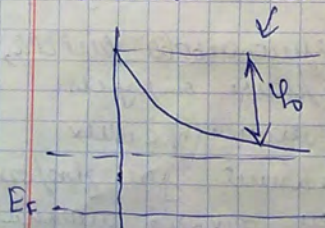


Пинкит контакт — це контакт, який має
ліній. симетричну ВАХ.

$$I = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

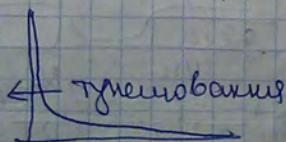
$V \ll kT/q \Rightarrow I \approx I_s (1 + \frac{qV}{kT} - 1) = I_s \frac{qV}{kT}$ — лінійна
для малих напруг — це омический контакт.

1. Шланг вихода бар'єра



2. Анигіляція

3. Тонка обл. шланг. згіню (вектор перов. n/n)



$$\underline{B (1):} \quad I = A T^2 S e^{-\frac{46}{kT}} \frac{qV}{kT}; \quad R = \frac{V}{I} = \frac{kT}{A T^2 S} e^{\frac{46}{kT}}$$

$$I = \frac{q n_0 \omega_n}{4} e^{-\frac{46}{kT}} \frac{qV}{kT};$$

$$R = \frac{4 \times T}{g^2 n_0 v_n} e^{q_0 / kT} \Rightarrow R \sim \frac{1}{n_0}$$

B (2): $I = \frac{q n_0 N_0}{4} (1 - e^{-qV/kT}) = \frac{q n_0 N_0}{4} \frac{qV}{kT}$
 \downarrow излучение мощности (вправо - влево)
 $R = \frac{4kT}{q n_0 N_0} \sim \frac{1}{n_0}$

B (3): $R \sim \sqrt{n} \sigma$

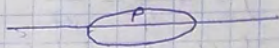
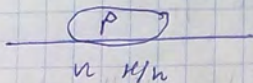
P-n neheilig

ρ -н перенос - це контакт кпн з різними типами провідності.



Методы формирования p-n перехода

1). Сплавной p-n переход

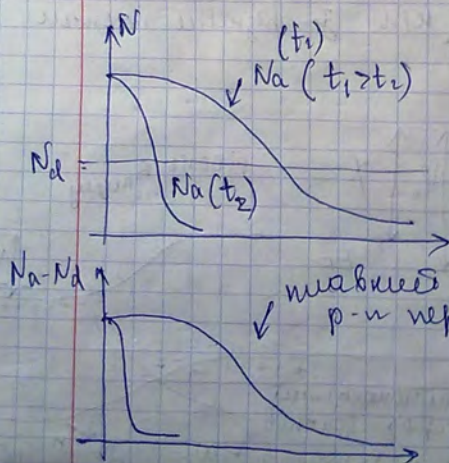


испроб. до то
его те тили (подо фре)
Агре охл. - нехресталли
за.

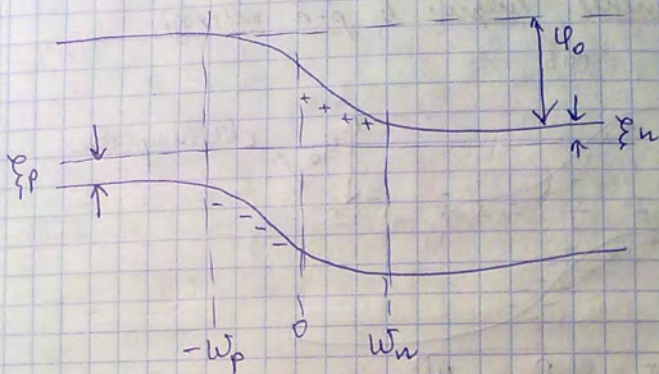
Разности концентрации
различ. Переконцентрац.
н/н.

2). Диффузионный p-n переход

Ула пов. при нанесении диффузии (з доминирование
процессов до н/н). Улапрв. меньше то
эффективнее, i доминирование процесс. в н/н.



Изменение p-n перехода



$$n_{n0} = N_d^+ = N_d = N_c e^{-\xi_n / kT}$$

$$p_{p0} = N_a^- = N_a = N_v e^{-\xi_p / kT}$$

$$-\xi_p = kT \ln N_a / N_v$$

$$-\xi_n = kT \ln N_d / N_c$$

$$\varphi_0 = \Delta E_g - \xi_n - \xi_p$$

$$n_i^2 = N_v N_c e^{-\Delta E_g / kT} \Rightarrow \Delta E_g = + kT \ln \frac{N_c N_v}{n_i^2}$$

$$\varphi_0 = kT \ln \frac{N_c N_v}{n_i^2} \cdot \frac{N_a}{N_c} \frac{N_d}{N_v} = kT \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

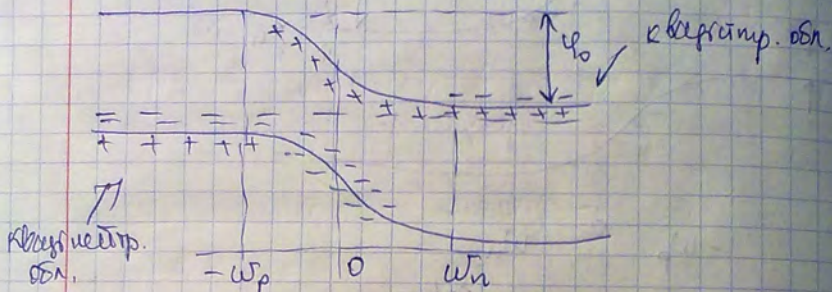
10/10

06.11.12.

Дане небуферизоване n/p $\varphi_0 < \Delta E_g$.

Xig поменш. енерг. в p-n переход.

опз



p-не граница:

прибл. конст. E -мбб
n-кп

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{q p(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s}$$

$$p(x) = q n_{p0}, \quad 0 < x \leq w_n$$

$$p(x) = q p_{p0}, \quad -w_p \leq x < 0$$

$$x = w_n \quad \varphi(w_n) = 0; \quad \left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{w_n} = 0$$

$$x = -w_p \quad \varphi(-w_p) = \varphi_0; \quad \left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{-w_p} = 0$$

$$\varphi_n(0) = \varphi_p(0) - \text{зміна в } "0"$$

$$\left. \frac{d\varphi_n}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\varphi_p}{dx} \right|_{x=0}$$

Розв'язок в області n:

$$\varphi(x) = \frac{q^2 n_{p0}}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} (w_n - x)^2$$

$$0 < x \leq w_n$$

В обл. р и лп:

$$\varphi(x) = \varphi_0 - \frac{q^2 p_{po}}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} (\omega_p + x)^2$$

$$x=0 \quad \frac{q^2 n_{no}}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \omega_n^2 = \varphi_0 - \frac{q^2 p_{po}}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \omega_p^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \varphi_0 = \frac{q^2 (n_{no} \omega_n^2 + \omega_p^2 p_{po})}{2 \epsilon_0 \epsilon_s}; \quad (\Rightarrow)$$

Выводим в итоге потенциал (знак "-", отталкивание)

$$q \omega_p p_{po} = q \omega_n n_{no}$$

$$\mathcal{E}_n(x) = - \frac{q n_{no}}{\epsilon_0 \epsilon_s} (\omega_n - x) \quad - \text{поле в n-к/п}$$

$$\mathcal{E}_p(x) = - \frac{q p_{po}}{\epsilon_0 \epsilon_s} (\omega_p + x) \quad - \text{поле в p-к/п}$$

Тогда из п. 3: $\omega = \omega_n + \omega_p \Rightarrow \omega_n = \omega_p \frac{p_{po}}{n_{no}} =$

$$= (\omega - \omega_n) \frac{p_{po}}{n_{no}} \Rightarrow \boxed{\omega_n = \frac{p_{po}}{n_{no} + p_{po}} \omega; \quad \omega_p = \frac{n_{no}}{n_{no} + p_{po}} \omega}$$

$$\Rightarrow \varphi_0 = \frac{q^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \left(\frac{p_{po} n_{no}^2}{(n_{no} + p_{po})^2} \omega^2 + \frac{n_{no} p_{po}^2}{(n_{no} + p_{po})^2} \omega^2 \right) =$$

$$= \frac{q^2 p_{po} n_{no} \omega^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s (n_{no} + p_{po})^2} (\underbrace{n_{no} + p_{po}}_{\Rightarrow})$$

$$\boxed{\varphi_0 = \frac{q^2 n_{no} p_{po}}{2 \epsilon_0 \epsilon_s (n_{no} + p_{po})} \omega^2} \Rightarrow \text{выразим через параметры от 3.}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s (n_{no} + p_{po}) (\varphi_0 - q \mu)}{q^2 n_{no} p_{po}}}$$

①. Резонанс несимметричный p-n переход:

$$p_{p0} \gg n_{n0}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s \varphi_0}{q^2 n_{n0}}} \quad |n=0, u=0.$$

ω - частота
конес. гармоник
в несимметрич.
обл.

$$\omega_n \approx \omega$$

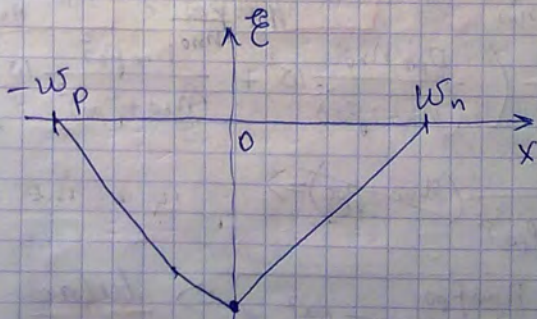
ОПЗ в основном в n-чсл. В ксироном.
обл. поле не проходит.

②. Симметричный p-n переход.

$$p_{p0} = n_{n0} = n_0$$

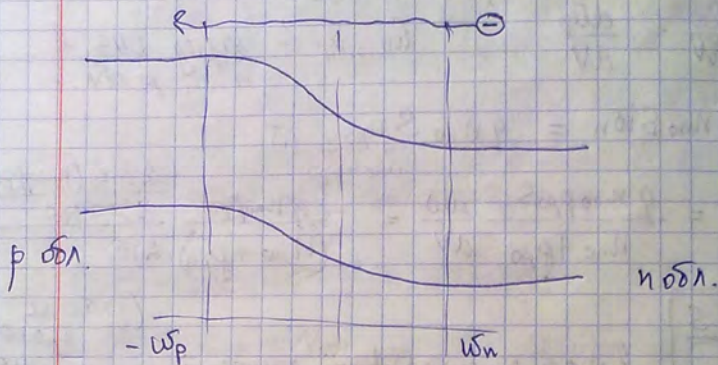
$$\omega = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s \cdot 2 n_0 \varphi_0}{q^2 n_0^2}} = \sqrt{\frac{4 \epsilon_0 \epsilon_s \varphi_0}{q^2 n_0}}$$

Зависимость поле φ_0 от d . (поле φ_0 смен).



ДЗ: Полевые неавнот p-n переход, в осевую
 $\rho(x) = qax$, a - заряды $a = \frac{d(n_d - n_a)}{dx}$

Шаней живень интерес? — статистика Шокис — р-но
 рас митта. Темн живеньб. и др, др.



Смещение в p-n переходе $j = j_n + j_p$

$$j_n \text{ (в прог. мео/м)} = j_{n1} - j_{n2}$$

j_{n1} — переход с n в p обл.

j_{n2} — переход с p обл. в n обл.

при $V=0 \Rightarrow j_n + j_p = 0; j_n = j_p = 0;$

$$j_{n1} = \frac{1}{4} q \sigma_n n_{n0} e^{-\frac{\phi_0 - qV}{kT}}$$

$$j_{n2} = \frac{1}{4} q \sigma_n n(-\omega_p)$$

$$V=0 \quad j_{n1} = j_{n2} \Rightarrow n(-\omega_p) = n_{n0} e^{-\frac{\phi_0}{kT}} = n_{p0} -$$

конц. e- в p обл.

$$\text{für } V \neq 0 \quad j_n = \frac{q \delta_n}{4} \left[n_{n0} e^{-\frac{q_0 - qV}{kT}} - n(-w_p) \right]$$

Сурдун в саванейтр обл. сурдун бедн. дур. касы.
коч. в.

$$V > 0 \quad j_n = 0 \quad n(-\omega_p) = n_{p0} \bar{e}^{\frac{\varphi_0 - qV}{kT}} = \underbrace{n_{p0}}_{n_{p0}} \bar{e}^{-\frac{\varphi_0}{kT}} e^{\frac{qV}{kT}} =$$

= $n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ — возм. е-и в на границе обл. ПЗ
в р. к/п.

Аналогічно: $p(w_n) = p_{n0} \exp\left(-\frac{qU}{kT}\right)$ — кінсов. конст.

Влияние ф. конт. неосн. полей при приеме ДД нагрузки —
назв. основные неосновных полей.

для бумажных и картон. изделий на ^{зрелом} под. пз -

Значительное - экстравертно пошлв

$$\Delta N_p(N_p) = N_{po} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

$$\Delta p_n(w_n) = p_{no} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

принадлежность ко их (друзей) в качестве гр. обл. \Rightarrow

Внешность стрижки.

$$J_p = \rho p \int \mu_p \varepsilon - \rho \mathcal{H}_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = \underbrace{q n_p \mu_n E}_{\text{heterogen}} + \underbrace{q D_n \frac{dn}{dx}}_{\text{diffus.}}$$

За малото рівне
гнелені поле
мале (в в. жостр?)

$\varepsilon = 0$
нехтуємо дрейф. потен.

$$j_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

$\overline{p} = e$ $u > 0$ $u_0 \downarrow$
 диффузия
 диффузионный эффект

для возбужденных состояний
 носч. носч. и вонч. не
 входят до ошч. контин.

$$\frac{1}{q} \frac{d j_p}{dx} = - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (\text{где } \Delta p \text{ — разность концентраций})$$

$$\Delta p \ll n_{p0}$$

$$- \frac{\Delta p}{\tau_p} = - \frac{1}{q} \frac{d j_p}{dx} \Rightarrow \frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{\tau_p \Delta p}$$

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{l_p^2}$$

$$l_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad \text{— габ. д.пр. носч. p}$$

$$\text{Граничные условия: } p(x_n) = p_{n0} e^{qV/kT}$$

$$p(\infty) = p_{n0}$$

$$p_n - p_{n0} = A \exp\left(-\frac{x}{l_p}\right) + B \exp\left(\frac{x}{l_p}\right)$$

$$x \rightarrow \infty \quad B = 0$$

$$p_n - p_{n0} = A e^{-x/l_p}$$

$$x = x_n \quad A e^{-x_n/l_p} = p_{n0} \left(1 - e^{qV/kT}\right)$$

$$A = p_{n0} e^{x_n/l_p} \left(1 - e^{qV/kT}\right)$$

$$p_n = p_0 e^{(w_n - x)/L_p} (e^{2V/kT} - 1)$$

12.11.12.

Домашнее задание N1

Знаменатель: $\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{qP(x)}{\epsilon \epsilon_0}$;

$p(x) = qax$, $a = \frac{d(w_n - w_p)/L_p}{dx}$;

$\varphi'' = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} qax \Rightarrow \varphi(x) = Ax^3 + Cx + D$; $A = \frac{q^2 a}{6 \epsilon_0 \epsilon_s}$

$\varphi(w_n) = 0$; $\varphi(-w_p) = \varphi_0$; $\frac{d\varphi}{dx}|_{w_n} = 0$ $\frac{d\varphi}{dx}|_{w_p} = 0$

$\varphi(w_n) = Aw_n^3 + Bw_n^2 + Cw_n + D = 0$

$\varphi(-w_p) = -Aw_p^3 + Bw_p^2 + Cw_p + D = \varphi_0$

$\frac{d\varphi}{dx} = 3Ax^2 + 2Bx + C = 0$ $\begin{cases} 3Aw_n^2 + 2Bw_n + C = 0 \\ 3Aw_p^2 - 2Bw_p + C = 0 \end{cases}$

$A(w_n^3 + w_p^3) + B(w_n^2 - w_p^2) + C(w_n + w_p) = 0 - \varphi_0$

$3A(w_n^2 - w_p^2) + 2B(w_n + w_p) = 0 \Rightarrow B = -\frac{3}{2}A(w_n - w_p)$

$B = -\frac{3}{2} \frac{q^2 a}{\epsilon_0 \epsilon_s} (w_n - w_p)$

$C = -3Aw_n^2 - 2Bw_n = -3 \frac{q^2 a}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} w_n^2 + \frac{9}{2} \frac{q^2 a}{\epsilon_0 \epsilon_s} (w_n - w_p) w_n =$
 $= \frac{q^2 a}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} (-w_n^2 + w_n^2 - w_p w_n) = -\frac{q^2 a}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} w_p w_n$

$D = \varphi_0 + Aw_p^3 - Bw_p^2 + Cw_p = \varphi_0 + \frac{q^2 a w_p^3}{6 \epsilon_0 \epsilon_s} + \frac{9}{2} \frac{q^2 a}{\epsilon_0 \epsilon_s} (w_n - w_p) w_p^2 +$
 $+ \frac{q^2 a}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} w_p^2 w_n = \varphi_0 - \frac{1}{12} \frac{q^2 a w_p^3}{\epsilon_0 \epsilon_s} - \frac{1}{4} w_p^2 w_n \frac{q^2 a}{\epsilon_0 \epsilon_s}$

Для нахождения p-n перехода $w = \left(\frac{12 \epsilon_s \epsilon_0 (\varphi_0 - \varphi_w)}{q^2 a} \right)^{1/3}$

$$\varphi(x) = \frac{q^2 a x^3}{6 \epsilon_0 \epsilon_s} - \frac{q^2 a}{4 \epsilon_0 \epsilon_s} (w_n - w_p) x^2 - \frac{q^2 a}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} w_n w_p x + \varphi_0 - \frac{1}{12} \frac{q^2 a w_p^3}{\epsilon_0 \epsilon_s} - \frac{1}{4} \frac{q^2 a}{\epsilon_0 \epsilon_s} w_p^2 w_n;$$

Емкость для p-n перехода:

$$C_{\text{пер}} = \frac{1}{2} q \cdot a \cdot w \cdot \frac{1}{2} S \cdot w \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8} q a w^2 S$$

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{1}{24} q a S \cdot 2w \frac{dw}{dV}$$

$$\frac{dw}{dV} = \frac{1}{3} \frac{1}{w^2} \frac{12 \epsilon_0 \epsilon_s}{q^2 a} = \frac{4 \epsilon_0 \epsilon_s}{w^2 q^2 a}$$

$$dQ = \frac{1}{24} q a S \cdot 2w \frac{dw}{dV} = \frac{1}{24} q a S \cdot 2w \cdot \frac{4 \epsilon_0 \epsilon_s}{w^2 q^2 a} dw = \frac{1}{3} \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{w} dw$$

$$dV = \frac{1}{3} \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{w} dw \Rightarrow \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{w}$$

$$\varphi_0 = \frac{q^2 a}{12 \epsilon_0 \epsilon_s} w^3;$$

Напряжение p-n перехода

$$-\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s} \approx \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_s} a x;$$

$$E(x) = -\frac{q a}{\epsilon_0 \epsilon_s} \frac{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - x^2}{2}$$

$$\varphi_0 - qV = \frac{q a w^3}{12 \epsilon_0 \epsilon_s} \quad w = \sqrt[3]{\frac{12 \epsilon_0 \epsilon_s (\varphi_0 - qV)}{q a}}$$

$$\varphi_0 \approx \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{a n_i^2}{2 n_i} \right)^2;$$

Емкость наоб. p-n перехода:

$$C = \frac{dQ}{dV} = - \frac{d \left(\frac{q a w^2}{8} \right)}{d \left(\frac{q a w^3}{12 \epsilon_0 \epsilon_s} \right)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{w} = \left[\frac{q a \epsilon_0^2 \epsilon_s}{12 \epsilon_0 \epsilon_s (\varphi_0 - qV)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$Q = \frac{1}{2} q a w \cdot \frac{1}{2} S w \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8} q a w^2 S;$$

13.11.12.

$$P_n(x) = P_{n0} + P_{n0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{W_n - x}{L_p}} - \text{визначити конст.}$$

Конфігурація заряду в кб.-нейтронизованій області:

$$j_p = -q D_p \frac{dp}{dx} = -q D_p P_{n0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \frac{(-1)}{L_p} e^{\frac{(W_p - x)}{L_p}} =$$

$$= \frac{q D_p P_{n0}}{L_p} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{(W_p - x)}{L_p}}$$

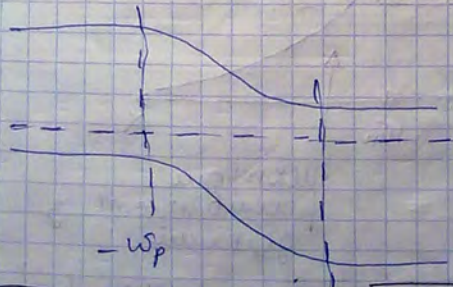
$$x = W_n: j_p(W_n) = \frac{q D_p P_{n0}}{L_p} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \rightarrow \text{в еквівалентній схемі}$$

$$j_n(-W_p) = \frac{q D_n N_{p0}}{L_n} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right); - \text{аналогічно визначити}$$

$$j = j_n + j_p \quad j_n = f(x), \quad j_n \neq f(x), \quad \text{але } j \neq f(x).$$

В точці $p-n$ переходу неможливо визначити заряду - невідомості.

$$\text{В обл. кб. } (-W_p; W_n) \quad j_n \neq f(x), \quad j_p \neq f(x).$$



$$j(-W_p) = j_n(-W_p) + j_p(-W_p) =$$

$$= j_n(-W_p) + j_p(W_n)$$

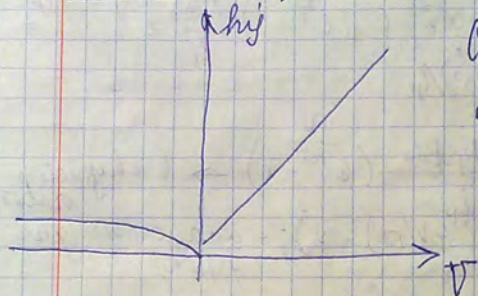
$$\text{В ОДЗ } j_p = \text{const} \\ j_p = \text{const.}$$

$$j = \left(\frac{q D_n N_{p0}}{L_n} + \frac{q D_p P_{n0}}{L_p} \right) \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

- ВАР для $p-n$ переходу, $p-n$ шотки.

$$1). \underline{V < 0, |V| \gg \frac{kT}{q}} \quad j = j_s = \left(\frac{q D_n N_{A0}}{L_n} + \frac{q D_p P_{A0}}{L_p} \right)$$

$$2). \underline{V > 0, |V| \gg \frac{kT}{q}} \quad j = j_s e^{\frac{qV}{kT}} \Rightarrow j_{ij} = j_{ijs} + \frac{qV}{kT}$$



Смещение в p-n перех. увеличивается, а в диод. Шоттки основным смещение.

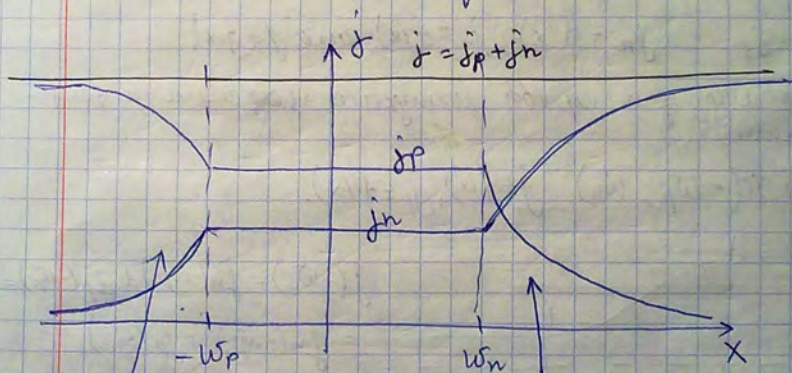


график пересек.
з е-ми.

Полный интеграл
в n обл.

электроны
рекомбинируют з
дырками

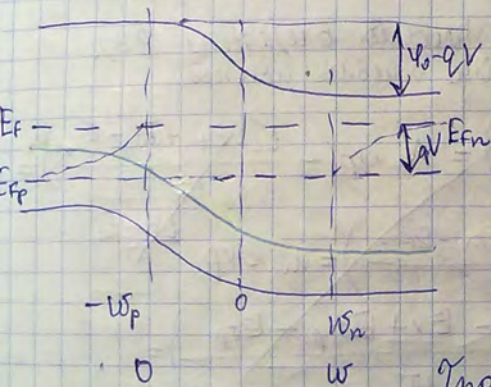
Е-ми имеют в p
область.

Д/з: построить
возможн дощ
в цих областях

- 1). наявність генераторів - рекомб. в отз;
- 2). явища при великому μ -ні інжекції;
- 3). вплив дифузії бази
- 4). промисла база
- 5). краєві поверхневі ефекти
- 6). явища пробою

Реальний
ВАХ
визначається
дог. ВАХ
де μ -
швидк.
(у. г. і о. г.).

Вплив рекомбінації



$$J_{\text{рек}} = q \int_0^w \frac{dn}{dt} dx$$

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{n_p - n_i^2}{\tau_{n0}(p+p_0) + \tau_{p0}(n+n_0)}$$

(формула Шоклі-Рієра)

$$\tau_{n0, p0} = \frac{1}{\delta_{n, p} \sigma_{n, p} N_T}$$

N_T - концентрація ун. рекомбінації.

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right); \quad p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_1}{kT}\right); \quad p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_1 - E_v}{kT}\right)$$

(конс. е-нів, конс. μ ф. рівн. з рівнем напруги).

$$np = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_v}{kT}\right) =$$

$$= N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{kT}\right) \exp\left(+\frac{E_{Fp} - E_{Fn}}{kT}\right) = n_i^2 e^{\frac{E_{Fp} - E_{Fn}}{kT}};$$

$$np = n_i^2 e^{qV/kT}$$

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{n_i^2 (e^{qV/kT} - 1)}{\tau_{n0}(p + p_0) + \tau_{p0}(n + n_0)}$$

Для упрощения примем $\tau_{n0} = \tau_{p0} = \tau_0$.

$N_c = N_v$, $E_c = E_i$ (энерг. уровней в середине 33).
 где E_i — энергия основного уровня.

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i + E_{Fn} - E_{Fn}}{kT}\right) =$$

$$= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i + E_{Fn} - E_{Fn}}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right).$$

$$p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_i - E_v + E_{Fp} - E_{Fp}}{kT}\right) =$$

$$= n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_v}{kT}\right).$$

$$q_0 (n + p + n_1 + p_1) \neq$$

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fn} - E_i + E_i}{kT}\right) =$$

$$= N_c e^{-\frac{(E_c - E_i)}{kT}} \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) = n_i e^{\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}}.$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_{Fp} - (E_v + E_i - E_i)}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_i - E_v}{kT}\right) \times$$

$$x \exp\left(-\frac{E_{FP} - E_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{FP}}{kT}\right)$$

$$n_0 \left(n_i e^{\frac{(E_{Fn} - E_i)/kT}{}} + n_i e^{\frac{(E_i - E_{FP})/kT}{}} \right) =$$

$$= n_0 n_i \left(e^{\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}} + e^{\frac{E_i - E_{FP}}{kT}} + 2 \right)$$

$$\frac{dn}{dt} \rightarrow \max, \quad E_{Fn} + E_{FP} = E_i$$

$$n_0 n_i \left(e^{\frac{2E_{Fn} - E_{Fn} - 2E_{FP}}{2kT}} + \exp\left(\frac{E_{Fn} + E_{FP} - 2E_{FP}}{2kT}\right) + 2 \right) =$$

$$= n_0 n_i \left(\exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{FP}}{2kT}\right) + \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{FP}}{2kT}\right) + 2 \right) = \frac{qV}{2kT}$$

$$= 2 n_0 n_i \left(\exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{FP}}{2kT}\right) + 1 \right) = 2 n_0 n_i \left(e^{\frac{qV}{2kT}} + 1 \right);$$

$$\left(-\frac{dn}{dt} \right)_{\max} = \frac{n_i^2 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)}{2 n_0 n_i \left(\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) + 1 \right)} = \frac{n_i \left(e^{\frac{qV}{2kT}} + 1 \right) \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)}{2 n_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) + 1 \right)}$$

$$= \frac{n_i \left(\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) + 1 \right)}{2 n_0};$$

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{\max} = \frac{n_i}{2 n_0} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} + 1 \right)$$

$$J_{\text{gen}} \approx q \frac{n_i w}{2 n_0} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)$$

high \nearrow

$\frac{q}{2kT}$

V

$V > \frac{kT}{q}$

$V > 0$

$J_{\text{gen}} \sim e^{\frac{qV}{2kT}}$

when $V < 0$, when using $n_p \ll n_i^2 \Rightarrow$

$$\Rightarrow \left| \frac{dn}{dt} \right| = \frac{n_i^2}{n_0 (p + p_i) + \bar{p}_0 (n + n_i)} = \frac{n_i \cdot n_i - 2}{2 (n_0 (p + p_i) + \bar{p}_0 (n + n_i))}$$

$$= \left[\begin{matrix} n \ll n_i \\ p \ll p_i \end{matrix} \right] = \frac{2n_i n_i'}{2(\tau_{n0} p_i + \tau_{p0} n_i)}$$

Домашня робота №2

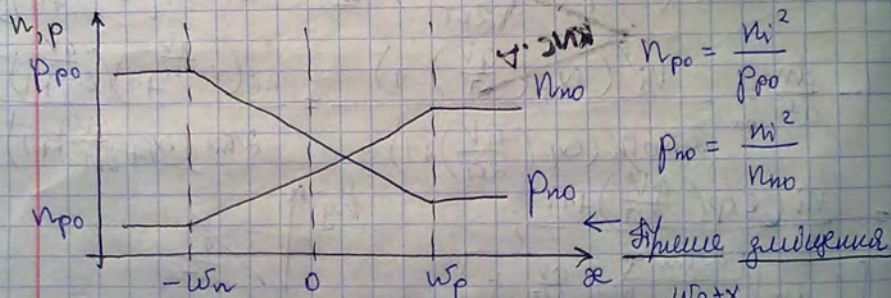
Побудувати логарифмічні координати у р, n областях.

Фрагментувати, щоб $pn = n_i^2$

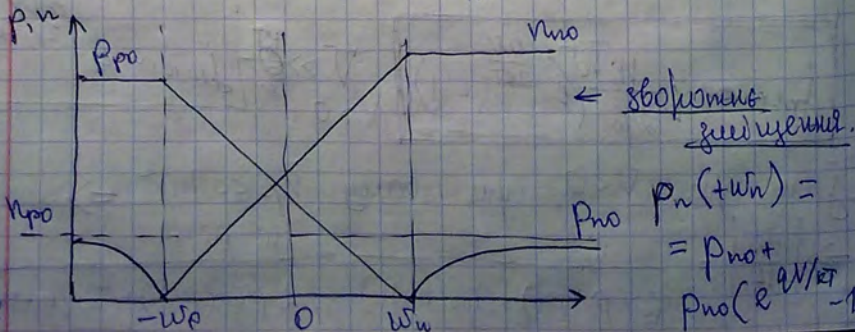
$$pn(x) = p_{n0} + p_{n0} (e^{qV/kT} - 1) e^{\frac{W_n - x}{L_p}}$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \quad \text{— неперервна рівновага}$$

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{(E_f - E_i) - (E_p - E_n)}{kT}\right)$$



$$np(x) = n_{n0} + n_{n0} (e^{qV/kT} - 1) e^{\frac{-W_p + x}{L_n}}$$



Домашняя работа № 1 (Электроника)

Возмущенный тавтолог р-н переход, в котором $\rho(x) = qax$, где a - зарядовый ($a = \frac{d(N_d - N_a)}{dx}$).

Дифференциал выражения для w , $\varepsilon(x)$. Подстановка при $w_n = w_p = w/2$. Асимптотическое значение для малого р-н переходу.

Р-н Физсона: $\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q\rho(x)}{\varepsilon_0\varepsilon_s}$, где $\rho(x) = qax$

$\psi'' = \frac{q^2ax}{\varepsilon_0\varepsilon_s} \Rightarrow$ разбегает изогнуто у границы

$\psi = Ax^3 + Bx + C$

$6Ax = \frac{q^2ax}{\varepsilon_0\varepsilon_s} \Rightarrow A = \frac{q^2a}{6\varepsilon_0\varepsilon_s}$

$\psi = \frac{q^2a}{6\varepsilon_0\varepsilon_s} x^3 + Bx + C$

Температурный

$\psi(w_n) = Aw_n^3 + Bw_n + C = 0$

$\psi(-w_p) = -Aw_p^3 - Bw_p + C = \psi_0$

$-Aw_p^3 - Aw_n^3 - Bw_p - Bw_n = \psi_0 \Rightarrow B = \frac{-\psi_0 - A(w_p^3 + w_n^3)}{w_p + w_n}$

$C = -Aw_n^3 + \frac{\psi_0 + A(w_p^3 + w_n^3)}{w_p + w_n} w_n = \frac{-Aw_n^4 - Aw_n^3 w_p + \psi_0 w_n + Aw_n^4 w_p}{w_n + w_p}$

$= w_n \frac{\psi_0 + A(w_p^3 - w_n^2 w_p)}{w_n + w_p}$

$\psi = \frac{q^2a}{6\varepsilon_0\varepsilon_s} x^3 - \frac{\psi_0 + \frac{q^2a}{6\varepsilon_0\varepsilon_s} (w_p^3 + w_n^3)}{w_n + w_p} x + w_n \frac{\psi_0 + \frac{q^2a}{6\varepsilon_0\varepsilon_s} (w_p^3 - w_n^2 w_p)}{w_n + w_p}$



20. 11. 42.

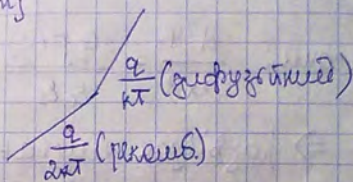
$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_i^2}{\tau_{np} p_1 + \tau_{po} n_1} = \left[\begin{matrix} n \ll n_1 \\ p \ll p_1 \end{matrix} \right] = \frac{n_i^2}{\tau_{np} p_1 + \tau_{po} n_1} = \frac{n_i^2}{2 n_i} = \frac{n_i}{2 \tau_i}$$

где $\tau_i = \frac{\tau_{np} p_1 + \tau_{po} n_1}{2 n_i}$

$$j_{\text{ген}} = \frac{q n_i^2}{2 \tau_i} \sim (V_0 - qV)^{1/2} \quad \text{— где прямого перехода}$$

$$\sim (V_0 - qV)^{1/3} \quad \text{— где туннельного}$$

$\ln j$



ВАХ p-n перехода с широкой базой
и с великими длинами инжекции

В n-к/п вычисл.: $\frac{dp}{dx} \rightarrow$ диффуз. ток (обусловл. градиентом конц.)

Ток будет из-за конц. e-ов

$$\frac{dn}{dx} = \frac{dp}{dx} \quad (\text{из-за сохранения количества})$$

E-Д. пары диффундируют в широкую p-н во взаимного к-ту.

В базе J диффуз. ток D и E. В p-n переходе

і зупинений дрейфовий потік е-нів від осей конт. до р-н переходу.

В обласі п-н зупинені потоки е-нів врівноважені:

$$j_n = q n \frac{dn}{dx} + q \mu_n n E = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = - \frac{1}{n} \frac{dn}{\mu_n} \frac{dn}{dx} = - \frac{kT}{q} \frac{1}{n} \frac{dp}{dx}$$

Потім миб. в об.-нейтр. обл. дрейфовий потік дріжок.

$$j_p = -q p \frac{dp}{dx} - q p_n \frac{kT}{q} \frac{dp}{n_n dx} =$$

$$= -q p \left(1 + p_n \frac{\mu_p kT}{p q} \frac{1}{n_n} \right) \frac{dp}{dx} = -q p \left(1 + \frac{p_n}{n_n} \right) \frac{dp}{dx} =$$

$$= -q p \left(1 + \frac{p_n}{n_{no} + p_n} \right) \frac{dp}{dx}$$

За великого р-не інжекції $p_n \gg n_{no}$ $\frac{p_n}{n_{no} + p_n} \rightarrow 1 \Rightarrow$

$$\Rightarrow j_p = -q p (1+1) \frac{dp}{dx} = -2q p \frac{dp}{dx}$$

Отже, ми бачимо, що велика складова зводиться до того, що утв. дрейфова складова зникає.

Треба врахувати ще таке при великому рівні інжекції, тобто великому потоку дрейфова складова за малого р-не інжекції.

Падіння напруги на базі за великого р-не інжекції.

$$V = V_0 + V_s = I_{cs} + V_D$$

→ падіння напруг. на р-н перех.

Падіння напруги на базі обумовлене во зв'яз. падінням напруги на базі при фронтових струмках та і зарядженими носіями збільшеною концентрацією заряджених носіїв

Потрібно є напруга, що забезп. проходіння носіїв (V_D)

$$I = I_s (\exp(q(V - I_{cs})/kT) - 1)$$

I мале: $I_{cs} \ll V$

поки що вважалимо $V_D > I_{cs}$, розглядаємо лише

$$V_D = \int_{0.0}^{0.01} E dx = - \int_0^{\infty} \frac{kT}{q} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = - \frac{kT}{q} \int_{n(0)}^{n_{no}} \frac{dn}{n}$$

(велика база)

$$= - \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n(0)} = - \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n_{no} + p(0)}$$

$$n(0) = n_{no} + p(0)$$

$$p_n(0) = p_{no} e^{qV_0/kT}$$

За великого р-не інжекції: $n_{no} \ll p(0)$

$$n(0) \approx p_n(0) = p_{no} e^{qV_0/kT};$$

$$V_{\Delta} = - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no}}{p_{no}} e^{-qV_0/kT} \right) = + \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{no}}{n_{no}} + V_0$$

$$n_{no} = n_i^2 / p_{no}$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{no}}{n_i^2} + V_0 = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{no}}{n_i} + V_0$$

$$V_0 = V - V_{\Delta} = V - 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{no}}{n_i} - V_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2V_0 = V - 2 \frac{kT}{q} \ln p_{no}/n_i$$

$$V_0 = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{no}}{n_i}$$

$$j_p = - q \Delta p \frac{dp}{dx}$$

$$p_n(x) = p_{no} + p_{no} \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) e^{-x/l_p}$$

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{p_{no}}{l_p} \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) e^{-x/l_p}$$

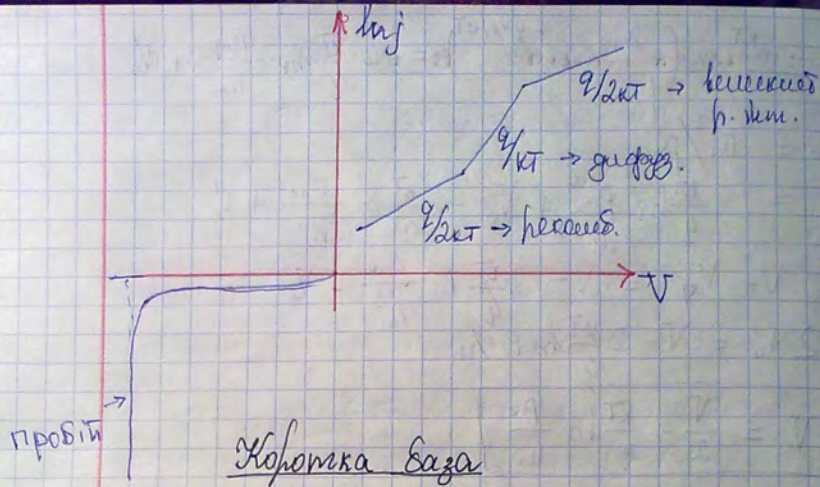
$$j_p = + q \Delta p \frac{p_{no}}{l_p} \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) e^{-x/l_p}$$

$$x=0 \quad j_p = q \Delta p \frac{p_{no}}{l_p} \left(e^{\frac{qV}{2kT} \cdot \frac{n_i}{p_{no}}} - 1 \right) e^{-x/l_p}$$

$$x=0: \quad j_p(0) = \frac{n_i}{l_p} \frac{q \Delta p p_{no}}{q \Delta p p_{no}} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - \frac{p_{no}}{n_i} \right)$$

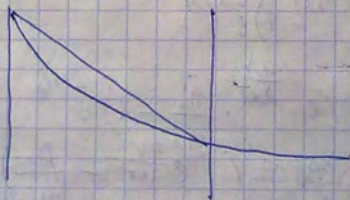
$$\Rightarrow j_p(0) = \frac{2 q \Delta p n_i}{l_p} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - \frac{p_{no}}{n_i} \right)$$

При увеличении температуры: $p_{no} \rightarrow n_i \Rightarrow j_p(0) \sim \frac{q \Delta p n_i}{l_p} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)$
 $j_p(0) \sim e^{\frac{qV}{2kT}}$, при $V \gg \frac{2kT}{q}$ (тогда уже почти все носители перемещаются).



Короткая база

В кв. - истинных общ. треба знания $\frac{dp}{dx}$
 Информации может доказать со своего личного
 контакта и факт. извещения переселенцев.



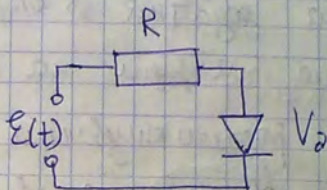
$W_n \leq l_p \rightarrow$ не изменить баз. переселенцев.
 (база) при фак. возр. $\frac{dp}{dx}$

Снижение при в. ман. изв. пересел. уменьш.
 т.е.е.

Технически процеси в диоди з р-п преход.

При пикни гукни импулсу реф. год. напреж.
вст. процесом некого реж. Тукат нех. процес
одреден. мери. процесив, ил. вбгуб. в диоди:

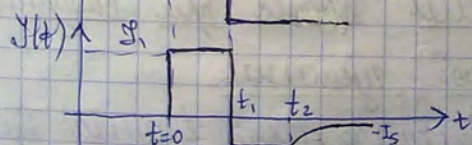
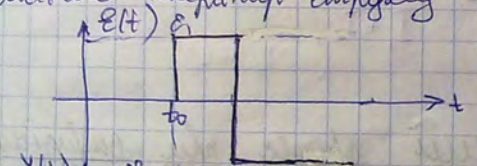
1. включение
2. выключение
3. переключение



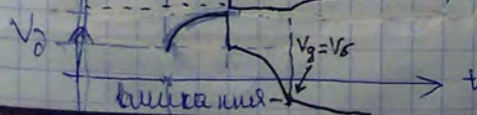
$$I(t) = \frac{E(t) - V_D}{R}$$

Если $V_D \ll E(t) \Rightarrow I(t) \approx \frac{E(t)}{R}$

Можно генерировать импульсы



на р-п перех.

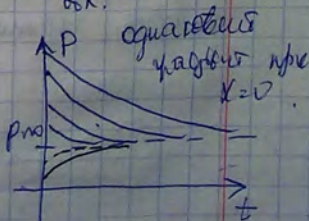


$$P(\omega_n) = P_{no} e^{qU/nT}$$

$$I_{pk} = \frac{q_p}{\tau_p}$$

$$I_{pek} < I_{inx} \geq I_1$$

б. св. - нестр. б. л.



Конец. Әйелік жақын. в отз за пая. перех. з
р в п обл. і за рех. пессимизмі, а
чугабул буге тмашм. $2V_{\text{от}}$

Далее $p_n(u_n) = p_{n0} e$ і $p_n(u_n) > p_{n0}$ -
пайфура жогатия \Rightarrow отір р-п перех. пессим,
падінше пайфури на павлеу шале \Rightarrow $T_{\text{пессим}}$

Стан розаеокнування заряду ($p_n > p_{n0}$) $\Rightarrow V_{\text{от}}$

Стан встановлення зв. спору ($p_n < p_{n0}$).

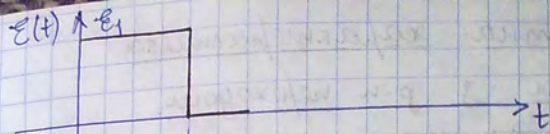
$p_n = p_{n0}$ в момент часу t_2 .

$$\text{erf}\left(\frac{t_{\text{про}}}{\tau}\right)^{1/2} = \frac{I_1}{I_1 + I_2}$$

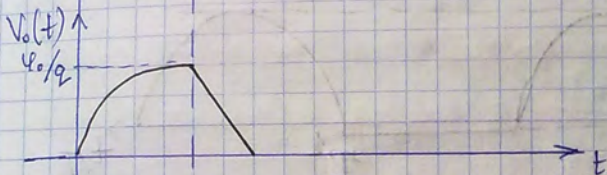
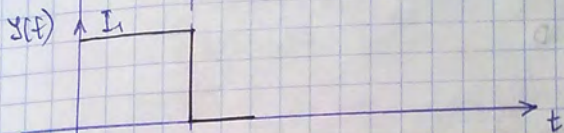
\downarrow
ф-я пессим

Терезідний процес при стирнях
вешкої густини.

Пайфура, що прикидається внаслідок великої
факель інтересів.



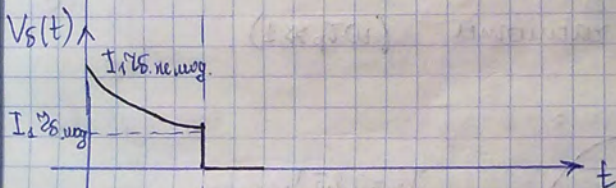
$$I_1 = \frac{E_1}{R}$$



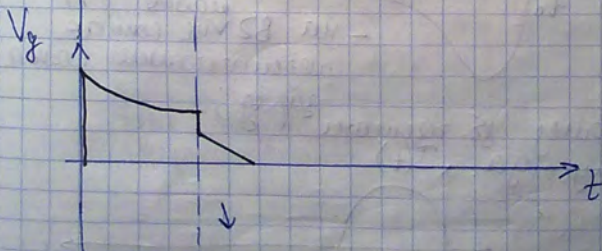
← нагрузка создает
минимум
(индукция между
замкнутым контуром)

Отпр. брже максимума,
до макс. коэф. в
бума $p_{no} \rightarrow p_n \gg p_{no}$
и n_{no}

Эмг. - магнетизм
отпр.



$$V_g = V_s + V_o$$

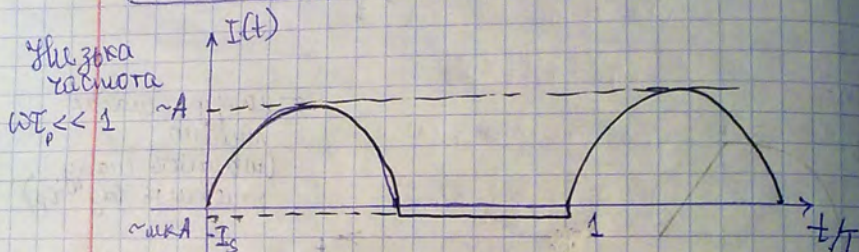
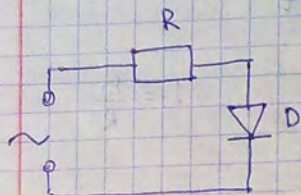


ниже минимума
ЭРС (мод по мн. з-у) \Rightarrow по код безразлично τ_p !

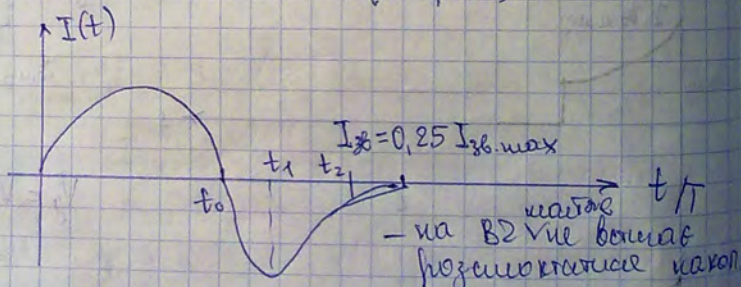
Частотна характеристика

Діоди з р-п переходом.

$V = V(t)$ - синусоїда



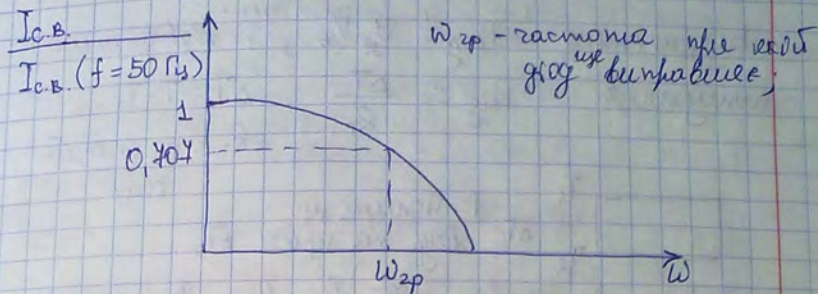
При більшій частоті ($\omega T_p \approx 1$)



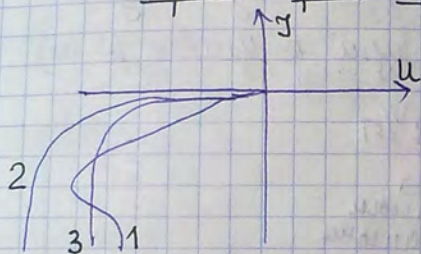
При подальшому зб. частоти
буде синусоїда.
($\omega T_p \gg 1$)



$$I_{\text{avg.}} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt$$



Пробит p-n переходу.



- 1). темноватый
- 2). нависший
- 3). тучный пробит

- 1). Выходит вы. повышается t° роста за 1.сек. популин.
по на пшаву видни.
- 2). Висли. фототого зб. конст. пшав в/цувствості
удельної довжини в ОПЗ;
- 3). Выходит при зб. напруги а. поля в ОПЗ ит
до значень при яких товщина попереч. бар'єра
стає настільки малою, що стає сфотеевою пшав.
интернование;

Термодиоды

Возмущенное состояние $P_{aug} = q_0 V_{ab}$, i — возмущенные
 неупорядоченные $P_{sig} = \frac{\Delta T}{R_T}$ $\Delta T = T - T_0$
 R_T — тепловой сопротивление



P — мощность, возмущ. на перех. ΔT ;

$\tau = R_T \cdot C_T$ G — теплоемкость

В условиях менее. $P_{sig} = P_{aug} \Rightarrow$
 $\Rightarrow V = \frac{\Delta T}{R_T}$ — напряжения в условиях $p-n$;

$$I = f\left(\frac{I R_T}{T}\right)$$

$$qV/kT$$

$$I_{np} \sim f(T) \cdot e^{-\frac{qV}{kT}}$$

напряжения силы тока

при $I = \text{const}$ $V \sim T$

ДЗ:

Определение зависимости напряжения на $p-n$ переходе брэг метизированных.

$$I(t) = K_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_g}{kT}}$$

$$V(T) \Big|_{I=\text{const}} \quad \text{— зависимость}$$

показатели \uparrow

T_0 — темп. срегов.

$$I(t) = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT} + \frac{\Delta E_g}{kT_0} - \frac{\Delta E_g}{kT_0}\right) =$$

$$= K_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_g}{kT_0}} \cdot e^{\frac{\Delta E_g}{kT_0} - \frac{\Delta E_g}{kT}} =$$

$$= \underbrace{K_0 e^{-\frac{\Delta E_g}{kT_0}}}_{I(T_0)} \cdot e^{\frac{\Delta E_g(T-T_0)}{kT_0 T}} \approx \underbrace{I(T_0)}_{\substack{\text{в состоянии равновесия} \\ \text{при } T_0}} \cdot e^{\frac{\Delta E_g}{kT_0^2} \Delta T} = I(T_0) \cdot e^{+d_0 \Delta T}$$

$$\Rightarrow I(T) = I(T_0) \cdot e^{d_0 \Delta T} \quad - \text{ в состоянии равновесия при } T_0$$

$$d_0 = \frac{1}{T} \frac{dI}{dT} \quad \leftarrow d_0 = \frac{\Delta E_g}{kT_0^2}$$

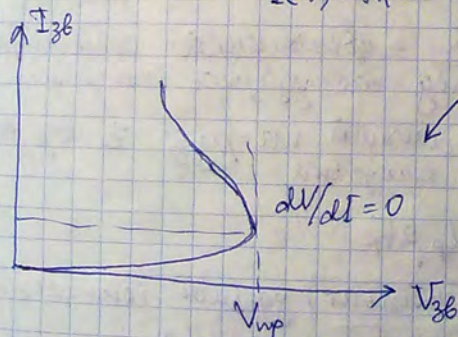
можно
написать

$$\frac{I(T)}{I(T_0)} = e^{d_0 \Delta T}$$

$$\ln I(T)/I(T_0) = d_0(T - T_0)$$

$$T = \frac{1}{d_0} \ln \frac{I(T)}{I(T_0)} + T_0 \rightarrow \text{находим } T \text{ ищем } V_{np}$$

$$V = \frac{\Delta T}{IR} = \frac{\frac{1}{d_0} \ln \frac{I(T)}{I(T_0)}}{I(T) \cdot R}$$



$$\frac{dV_{zb}}{dI_{zb}} \bigg|_{V=V_{np}} = 0$$

$$\frac{1}{d_0 R T} \left(\frac{I(T_0)}{I(T)} \cdot \frac{1}{I(T_0)} I(T) - 1 \cdot \ln \frac{I(T)}{I(T_0)} \right) / I^2(T) = 0$$

$$\Rightarrow \ln \frac{I(T)}{I(T_0)} = 1$$

$$I_{np} = K_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_g}{kT}} \stackrel{=0}{\approx} I(T_0) \exp(d_0 \Delta T)$$

$$V_{np} = \frac{1}{d_0} \frac{1}{I_{np}(T) \cdot R} = \frac{1}{d_0 R \cdot I(T_0) \cdot \exp(d_0(T_{np} - T_0))}$$

$$\boxed{T_{np} - T_0 = \frac{1}{d_0}} \Rightarrow V_{np} = \frac{1}{d_0 R I(T_0) \cdot e}$$

где ϵ — менше. прод. пот. при $x_{\text{вн.}} \rightarrow 0$
 где ϵ — больше где $x_{\text{вн.}} \rightarrow 0$, чем на
 привычно внешне увеличивает.

03.12.12.

Доказание закона

$$P_{\text{прод.}} = P_{\text{вн.}} \Rightarrow IV = \frac{T-T_0}{R_T} \Rightarrow V = \frac{T-T_0}{IR_T}$$

$$I(T) = I(T_0) e^{\alpha \Delta T}$$

$$I(T) = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)$$

$$V = \frac{T-T_0}{I_0 R_T} e^{\Delta E_g / kT}$$

Лавинный пробой

04.12.12.

Лавинный пробой — избыточная концентрация
 носителей под действием ударной ионизации.

При достижении критической напряженности E возникает
 ударная ионизация.

$$g = d_n N_n + d_p p p_r$$

$d_{n,p}$ — коэффициенты ударной ионизации

$d = \frac{1}{n} \frac{dn}{dx}$ (к-то асимметрично-диффузия
 нар. на одинич. иониз. для $x_{\text{вн.}} \rightarrow 0$
 1 к-то).

В знаменателе берем: $d_n \neq d_p$.

И заменим \log напряженности электрич.
 поля.

$$\alpha = \frac{qE}{E_i} \exp\left(-\frac{E_i}{E\left(1 + \frac{E}{E_{\text{отт}}}\right) + E_{\text{выст}}}\right) = \alpha(E)$$

E_i - энергия ионизации

E - поле ионизации

$E_{\text{выст}}$, $E_{\text{отт}}$, E_i - значения напряж. а. поля при
 яких форма кривой выходящая из
 положения на отрицательных фронтах не ионизации
 форма;

1) При $E < E_{\text{отт}}$ $\alpha(E) \sim E e^{-E_i/E}$

2) $E > E_{\text{отт}}$ $\alpha(E) \sim E e^{-\frac{E_i E_{\text{отт}}}{E^2}}$

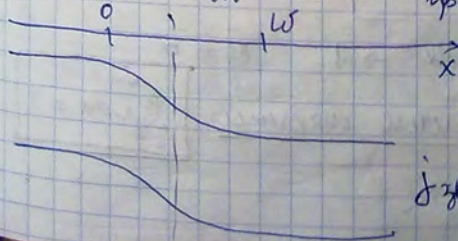
$$\alpha(E) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{B_i}{E^{\kappa}}\right)$$

$\kappa = 1$ Ge, Si

$\kappa = 2$ AsGa, InP

$\alpha = K_i \cdot E^m$ (у различных материалов разн.)
 ($m = 3 \div 9$)

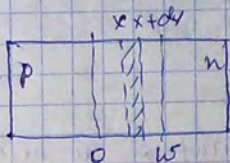
$$j_{\text{ф}} = \frac{q D_n n(w)}{l_n} + \frac{q D_p n(0)}{l_p}$$



$$\frac{n(w)}{n(0)} = M = (\text{коэф. умно-жения})$$

$$= \frac{p(0)}{p(w)}$$

$$j_{\text{ф}} = M \left(\frac{q D_n n_p}{l_n} + \frac{q D_p p_n}{l_p} \right) = M \cdot j_s$$

Умовавикликанийзавдання:

Значить до об'єкту p
 $n(0)$ - електронів в об'єкті,
 тоді до x створюються
 n_1 електронів;

потім створюються n_2 електронів
 в об'єкті. тоді $x+dx$ до w мають
 це n_2 електронів.

$$n(w) = n(0) + n_1 + n_2$$

Можна записати: dn - збільшення потіку електронів.

$$dn = dn(n(0) + n_1) dx + dp n_2 dx$$

Складаємо до dx підраховуємо n_2 електронів.

Вважаємо, що $dn \approx dp = d$.

$$dn = d(n(0) + n_1 + n_2) dx = dn(w) dx$$

$$\int_0^w : n(w) - n(0) = n(w) \int_0^w dx$$

$$1 - \frac{1}{M} = \int_0^w dx$$

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^w dx}$$

$$\text{коли } \int_0^w dx \rightarrow 1 \quad M \rightarrow \infty$$

Умова викликання завдання:

$$\int_0^w dx = 1$$

Знайдено ВДХ в области наведенного пробоя

$$I = (I_s + I_{\text{н}}) M$$

$$d(\mathcal{E}) = K_i \cdot \mathcal{E}^m - \text{высчит. по значениям}$$

$$\mathcal{E} = \frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} (w - x) \quad p^+ \text{ - n непереходу.}$$

$$\begin{aligned} \int_0^w d(\mathcal{E}) dx &= K_i \int_0^w \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \cdot (w - x)^m dx = \\ &= -K_i \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \frac{(w - x)^{m+1}}{m+1} \Big|_0^w = \frac{K_i}{m+1} \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m (w^{m+1} - 0) = \\ &= K_i \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \frac{w^{m+1}}{m+1}. \end{aligned}$$

Для пробоя p^+ - n переходу: $w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s V}{q N_d}}$

$$\begin{aligned} \int_0^w d(\mathcal{E}) dx &= \frac{K_i}{m+1} \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0}{q N_d} \right)^{\frac{m+1}{2}} \cdot \frac{m+1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s V}{q N_d}} = \\ &= \frac{K_i \cdot 2^{\frac{m+1}{2}} \cdot V^{\frac{m+1}{2}}}{m+1} \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^{\frac{m-1}{2}} \end{aligned}$$

В области пробоя $V = V_{np} \quad \int_0^w d dx = 1$

$$\frac{K_i \cdot 2^{\frac{m+1}{2}} \cdot V_{np}^{\frac{m+1}{2}}}{m+1} \cdot \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^{\frac{m-1}{2}} = 1 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{K_i \cdot 2^{(m+1)/2}}{m+1} \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^{\frac{m-1}{2}} &= \left(\frac{1}{V_{np}} \right)^{\frac{m+1}{2}} \\ \int_0^w d(\mathcal{E}) dx &= \left(\frac{V}{V_{np}} \right)^{\frac{m+1}{2}} \end{aligned}$$

$$I = \frac{I_s + I_{ren}}{1 - \left(\frac{V}{V_{np}}\right)^{m+1}}$$

- выраж для ВАХ
p-n перехода в
области пробоя.

$$V_g = V + I_{zb} \cdot Z_b \quad (\text{пробой внахвост. см/базу})$$

$$1 - \left(\frac{V}{V_{np}}\right)^{\frac{m+1}{2}} = \frac{I_s + I_{ren}}{I_{zb}}$$

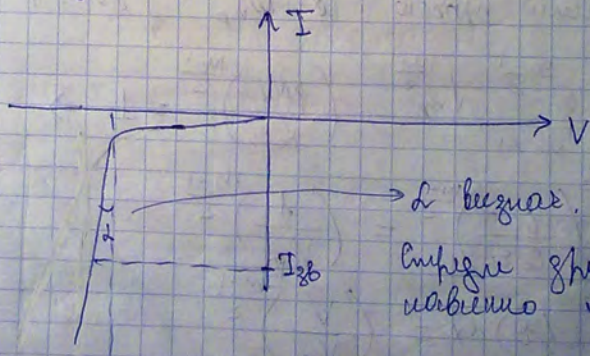
$$\left(\frac{V}{V_{np}}\right)^{\frac{m+1}{2}} = 1 - \frac{I_s + I_{ren}}{I_{zb}}$$

$$V = V_{np} \left(1 - \frac{I_s + I_{ren}}{I_{zb}}\right)^{\frac{2}{m+1}}$$

$$V_g = V_{np} \left(1 - \frac{I_s + I_{ren}}{I_{zb}}\right)^{\frac{2}{m+1}} + I_{zb} \cdot Z_b$$

$$I_{zb} \gg (I_s + I_{ren})$$

$$V_g = V_{np} + I_{zb} \cdot Z_b$$



Смещение
напряжения
при V_{np}

$$V_{np} = \frac{1}{2} \left(\frac{\kappa_i}{m+1} \right)^{-\frac{2}{m+1}} \cdot \left(\frac{q N_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^{-\frac{m-1}{m+1}}$$

При зб. $N_d \rightarrow V_{np} \downarrow$ (для низкого перехода).

Для материала: $V_{np} \sim a^{-\frac{m-1}{2(m)+1}}$

При зб. T^0 $V_{np} \uparrow$, со збільшенням температури.

$$V_{np, \text{лав.}} = V_{\text{лав. пр}}(I_0) [1 + \theta_n (T - T_0)]$$

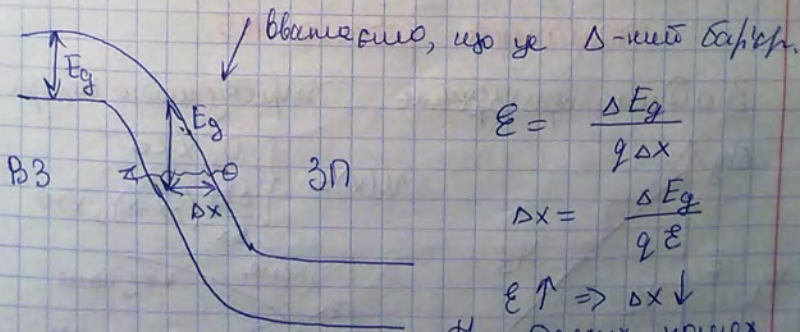
θ_n - T^0 коеф. лавинного пробоя.

$$\theta \sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Тунельний провід

Тунельний ефект є при $V=0$.

Для того, щоб в діоді з'явився суттєвий тунельний ефект



$$\epsilon = \frac{\Delta E_g}{q \Delta x}$$

$$\Delta x = \frac{\Delta E_g}{q \epsilon}$$

$$\epsilon \uparrow \Rightarrow \Delta x \downarrow$$

При деяких напругах саме так, що кожен прозохотний бар'єр стає

достаточно великим.

Словикний пробіт не може викликати ланіше, що звантася утвор. тупельного пробітоу.

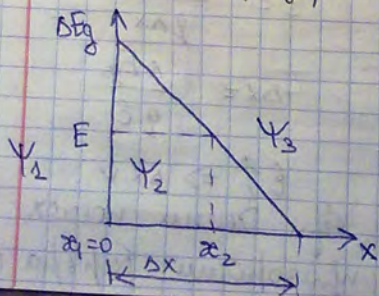
При зб. рівні члзв. ОПЗ $\downarrow \Rightarrow$ для викликання ланішого пробіт переба більший нелі, таліу тупельний пробіт не може викликати. При більших n ох таліу не може збгати достатко рано.

Тупельний пробіт відбуув. при поеліх ~~таких~~ більших n і в ланішому на 2 порядки.

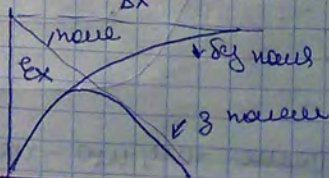
Дз:
всеп.
прехр. в бар'єра.

Домашня робота №5

Знайти прозорість прикутного бар'єра.



$$u(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{\Delta E_g}{\Delta x} (\Delta x - x), & x > 0 \end{cases}$$



$$\psi_1 = A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}; \quad \psi_2 = A_2 e^{ix} + B_2 e^{-ix};$$

$$\psi_3 = A_3 e^{ikx}$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = eE$$

$$\text{Ansatz: } \psi = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(u(x) - E)} dx \right\}$$

$$x_1 = 0 \quad u(x_2) = E \Rightarrow eE(\Delta x - x_2) = E \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_2 = \frac{eE\Delta x - E}{eE} = \Delta x - \frac{E}{eE}, \text{ wenn}$$

$$\psi = \psi_0 \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m} \int_{\Delta x - \frac{E}{eE}}^{\Delta x - \frac{E}{eE}} \sqrt{eE(\Delta x - x) - E} dx \right\} =$$

$$= \psi_0 \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m} \left[\frac{-2}{3eE} (eE(\Delta x - x) - E)^{3/2} \right]_{\Delta x - \frac{E}{eE}}^{\Delta x} \right\} =$$

$$= \psi_0 \exp \left\{ -\frac{4}{3\hbar} \sqrt{2m} \frac{(eE\Delta x - E)^{3/2}}{eE} \right\} = \psi_0 \exp \left\{ -\frac{4}{3\hbar} \frac{\sqrt{2m}}{eE} (\Delta E_g - E)^{3/2} \right\}$$

$$\text{Somit, } \mathcal{A}(E) = \psi_0 \exp \left\{ -\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \frac{(\Delta E_g - E)^{3/2}}{eE} \right\};$$

11.12.12

$$V_{пр.гн.} = V_{пр.проб} (I_0) [1 + \theta_T (T - T_0)]$$

$$|\theta_T| \sim |\theta_1|, \text{ але } \theta_T < 0.$$

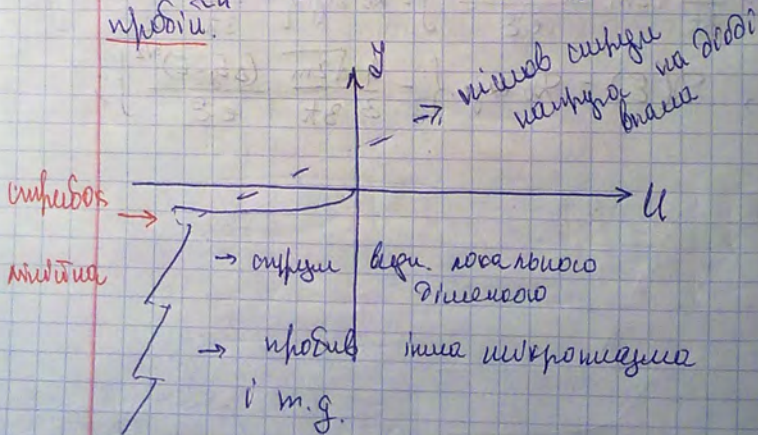
Запираю пробую подат з температурного

Локальний лавинний пробій.

В градах з великою однорідністю, може виникати в певних локальних ділянках.

$$V_g = V_{пр} \left(1 - \frac{I_s + I_r}{I_{зб}} \right)^{\frac{2}{m+1}} + I_{зб} \cdot 25$$

Інша назва мікропазищений лавинний пробій.



Через значимість наявного пробію може
бути шкідливий пробію, в таких випадках наявний
наявний пробію не співпадає.

Тетеротереходи

Формід, що утворюються двома різними кн.
Ближній отаєт фінки і 1° коєр. розширення.
Широко використовуються в кн нагерах.

Розніт це наявний перехід відн. переходи
мн 2 кн, якщо вперх $\sim a$ - взніт,
вперх ≥ 1 - наявний.

Ізотипні
мн провідн.
к/п н/п
к-п

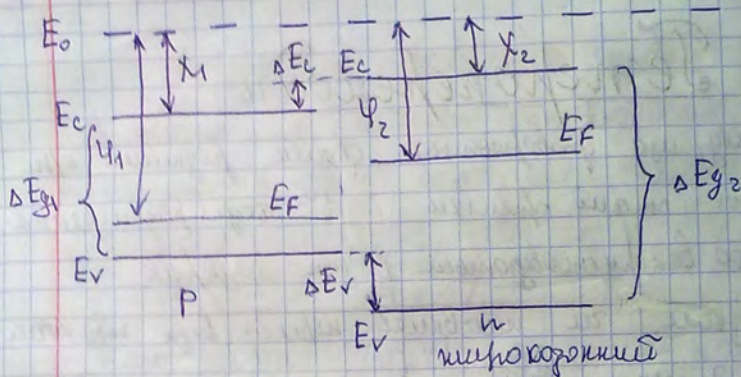
Антізотипні
мн пров. кн
не співпадають
р-п

p-n гетеропереход; Будем считать, что:

1). $\Delta E_{g1} < \Delta E_{g2}$

2). $\varphi_1 > \varphi_2$ (разности потенциалов)

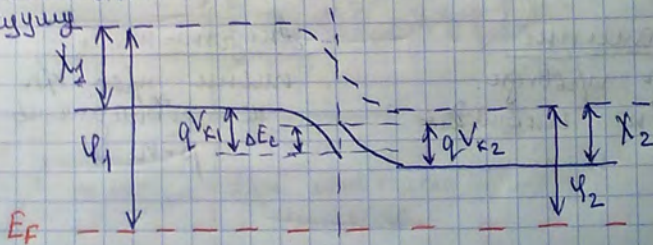
3). $\chi_1 > \chi_2$ (разности потенциалов)



Будем считать, что зоны диаграммы касаются в контакте:

Рисует вакуумный

E_0



E_f

Рисует p-n переход
впереход.

ΔE_v

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_{g2} &= \Delta E_{g1} + \Delta E_c + \Delta E_v \\ \Delta E_c &= \chi_1 - \chi_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta E_v = \Delta E_{g2} - \Delta E_{g1} - (\chi_1 - \chi_2)$$

Контактна різниця потенціалів: $qV_k = \varphi_1 - \varphi_2$,

$$qV_k = qV_{k1} + qV_{k2}$$

Висота бар'єру для електронів:

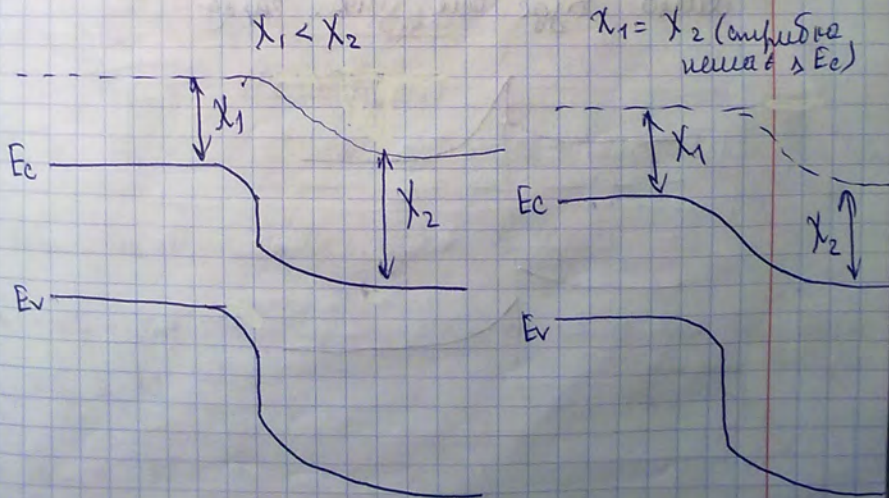
$$\varphi_{bp} = qV_{k1} + qV_{k2} + \Delta E_v$$

для електронів: $\varphi_{bn} = qV_{k2} + qV_{k1} - \Delta E_c$

чи то $\Delta E_c > qV_{k1} \Rightarrow \varphi_{bn} = qV_{k2}$.

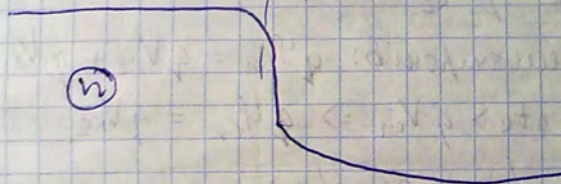
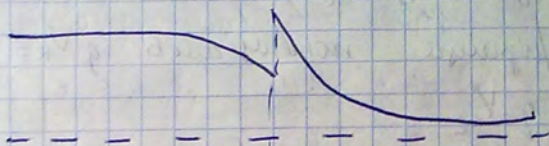
2/3: побуд. різні схемпереходів.

3/3.

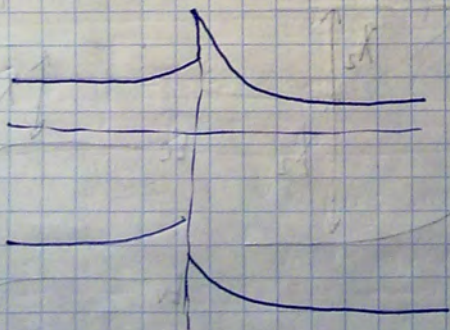


n-n переход (узко-широкой зонный);

немног. великой
к-от. отлив
из границы



много буре вел. пов. заряд. n



Діє потенціальної енергії в металопереході.

Для Фур'є: $\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{q\rho(x)}{\epsilon_0\epsilon_s}$ $\epsilon_s = \epsilon_{n,p}$

$-w_p < x < 0$ $\rho(x) = -qN_a = -qP_{p0}$

$0 < x < w_n$ $\rho(x) = +qN_d = qN_{n0}$

Гранич. умови: $x = -w_p$ $\varphi_p(-w_p) = E_{c1}$, $\left.\frac{d\varphi}{dx}\right|_{x=-w_p} = 0$;

$x = w_n$ $\varphi_n(w_n) = E_{c2}$ $\left.\frac{d\varphi_n}{dx}\right|_{x=w_n} = 0$

$\varphi_p(x) = E_{c1} - \frac{q^2 P_{p0}}{2\epsilon_0\epsilon_p} (w_p + x)^2$, $-w_p < x < 0$;

$\varphi_n(x) = E_{c2} + \frac{q^2 n_{n0}}{2\epsilon_0\epsilon_n} (w_n - x)^2$, $0 < x < w_n$.

$\varphi_k = qV_{kp} + qV_{kn}$

$qV_{kp} = \varphi(-w_p) - \varphi(0)$

$qV_{kn} = \varphi(0) - \varphi(w_n)$

$\varphi_n = E_{c1} - \frac{q^2 P_{p0}}{2\epsilon_0\epsilon_p} (w_p - w_p)^2 - E_{c1} + \frac{q^2 P_{p0}}{2\epsilon_0\epsilon_p} w_p^2 + \frac{q^2 n_{n0}}{2\epsilon_0\epsilon_n} w_n^2$

$+ E_{c2} - E_{c2} - 0 = \frac{q^2 P_{p0}}{2\epsilon_0\epsilon_p} w_p^2 + \frac{q^2 n_{n0}}{2\epsilon_0\epsilon_n} w_n^2$

$w = w_p + w_n$; $w_p P_{p0} = w_n n_{n0}$ - умова нейтральності, яку ми не врахували

$w_p = w \frac{n_{n0}}{P_{p0} + n_{n0}}$

$w_n = w \frac{P_{p0}}{P_{p0} + n_{n0}}$

$$\text{Полге}, \varphi_K = \frac{q^2}{2\epsilon_0} \left(\frac{\rho_{po}}{\epsilon_p} \frac{n_{no}^2}{(p_{po} + n_{no})^2} \omega^2 + \frac{n_{no}}{\epsilon_n} \frac{\rho_{po} \omega^2}{(p_{po} + n_{no})^2} \right)$$

$$= \frac{q^2 \omega^2 n_{no} \rho_{po}}{2\epsilon_0 (p_{po} + n_{no})^2} \left(\frac{n_{no}}{\epsilon_p} + \frac{\rho_{po}}{\epsilon_n} \right) \Rightarrow$$

$$\varphi_K = \frac{q^2 \omega^2 n_{no} \rho_{po}}{2\epsilon_0 (p_{po} + n_{no})} \frac{n_{no} \epsilon_n + \rho_{po} \epsilon_p}{\epsilon_p \epsilon_n} \Rightarrow \text{выразим } \omega$$

используем ОПС: $\omega = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_p \epsilon_n (n_{no} + \rho_{po})^2 \varphi_K}{q^2 n_{no} \rho_{po} (n_{no} \epsilon_n + \rho_{po} \epsilon_p)}}$

искусно $V \neq 0$: $\omega = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_p \epsilon_n (n_{no} + \rho_{po})^2 (\varphi_K + qV)}{q^2 n_{no} \rho_{po} (n_{no} \epsilon_n + \rho_{po} \epsilon_p)}}$

используем ОПС

искусно $\epsilon_s = \epsilon_p = \epsilon_n$:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s (n_{no} + \rho_{po})^2 (\varphi_K + qV)}{q^2 n_{no} \rho_{po} \epsilon_s (p_{po} + n_{no})}} \Rightarrow$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s (n_{no} + \rho_{po}) (\varphi_K + qV)}{q^2 n_{no} \rho_{po}}}$$

\downarrow выразим максимум ω и φ_K что
решим

Существование непереходу.

$$C = \frac{dW_p}{dV} = \frac{dW_n}{dV}$$

$$\frac{dW_p}{dV} = q p_{po} W_p = q \frac{p_{po} n_{no}}{p_{po} + n_{no}} W$$

$$C = q \frac{p_{po} n_{no}}{p_{po} + n_{no}} \frac{dW}{dV} = q \frac{p_{po} n_{no}}{p_{po} + n_{no}} \frac{1}{2W} q 2E_0 E$$

$\frac{dW}{dV}$:
↓
существование
или
выражение
или
существование

Задача № 3

Умноживаем значение $\Gamma_{np} \sim \text{const.} \cdot e^{\frac{qV}{kT}}$ и
вспоминаем, что $\Gamma = \text{const}$, следовательно выражение
 V (или значение) в зависимости от T .

$$\dot{J}_p = -q A_p \frac{dp}{dx}$$

$$j = \left(\frac{q A_n n_{po}}{l_n} + \frac{q A_p p_{no}}{l_p} \right) \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - \text{формула Шокли};$$

Для $\sigma_p \gg \sigma_n$, имеем:

$$n_{po} = \frac{n_i^2}{p_{po}} \ll p_{no}, \text{ где } p_{no} = \frac{n_i^2}{n_{no}} \Rightarrow j_s = \frac{q A_p p_{no}}{l_p} \text{ // если -}$$

$$\frac{n_i^2}{n_{no}} = \frac{N_c N_v}{N_D} e^{-E_g/kT} = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \left(\frac{m_e^* m_h^*}{1} \right)^{3/2} \frac{1}{N_D} e^{-E_g/kT}$$

$$j_s = \frac{4}{N_D} \left(\frac{2\pi}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} (kT)^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Найдем: $V(\frac{1}{T})$? Температура

$$d_0 = \frac{E_g}{kT_0^2} \quad V = \frac{1/d_0 \ln y(T)/y(T_0)}{y(T) R_T} \quad // y = \text{const}$$

$$y_{\text{норм}} = y_s e^{qV/kT} \quad y_{\text{норм}} = y_s = k_0 e^{-E_g/kT}$$

$$V = \frac{1}{d_0 R_T} \frac{1 \cdot e^{E_g/kT}}{k_0} \ln \left(\exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) + \frac{E_g}{kT_0} \right) =$$

$$= \frac{1}{d_0 R_T k_0} \exp \left(\frac{E_g}{kT} \right) \left[-\frac{E_g}{kT} + \frac{E_g}{kT_0} \right]$$

Пример

$$P_{\text{всг}} = P_{\text{всг.}} \Leftrightarrow IV = \frac{T-T_0}{R_T} \Rightarrow V = \frac{T-T_0}{y R_T}$$

из второго $y(T) = y(T_0) e^{\frac{qV}{kT}}$

$$\left. \begin{aligned} y(T) &= y(T_0) e^{\frac{qV}{kT}} \\ y(T) &= k_0 e^{-E_g/kT} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$V = \frac{T-T_0}{k_0 e^{-E_g/kT} R_T} = \frac{T-T_0}{k_0 R_T} e^{\frac{E_g}{kT}}$$

Задача по теме N 4

Знайти BAX для диодного p-n перехода

$$V_{np} \sim a^{-\frac{m-1}{2m+1}}$$

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dU}{dx}; \quad \mathcal{E}(x) = -\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \left(x^2 - \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right)$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{12 \epsilon_s \epsilon_0 q V}{q^2 a}} \quad - \text{ для диодного p-n перехода}$$

$$\int_{-w/2}^{w/2} K_i \left(\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \left(-x^2 + \left(\frac{w}{2} \right)^2 \right)^m dx = 2 K_i \left(\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \times$$

$$\times \int_0^{w/2} \left(-x^2 + \left(\frac{w}{2} \right)^2 \right)^m dx; \quad \text{заменим: } \xi = -\left(\frac{2x}{w} \right)^2 + 1;$$

$$\sqrt{\frac{1-\xi}{2}} \cdot \frac{w}{2} = x, \quad dx = -\frac{w}{2} \frac{d\xi}{2\sqrt{1-\xi}}$$

$$\int_0^{w/2} \left(\left(\frac{w}{2} \right)^2 - x^2 \right)^m dx = \left(\frac{w}{2} \right)^{2m} \int_0^{w/2} \left(1 - \left(\frac{2x}{w} \right)^2 \right)^m dx = \frac{1}{2} \left(\frac{w}{2} \right)^{2m+1} \times$$

$$\times \int_0^1 \xi^m (1-\xi)^{-1/2} d\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{w}{2} \right)^{2m+1} \cdot B(m+1; \frac{1}{2})$$

$$\int_0^1 dx = 1 \Rightarrow \int = 2 K_i \left(\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \frac{1}{2} \left(\frac{w}{2} \right)^{2m+1} B(m+1; \frac{1}{2}) =$$

$$= K_i \left(\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \frac{1}{2^{-(2m+1)}} w^{2m+1} B(m+1; \frac{1}{2}) = K_i 2^{-(2m+1)} \left(\frac{qa}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \times$$

$$\times \left(\frac{12\epsilon_0 \epsilon_s \varphi_0}{q^2 a} \right)^{\frac{2m+1}{3}} B(m+1; \frac{1}{2}) = K_i 2^{-(3m+1)} \left(\frac{12\varphi_0}{q} \right)^{2m+1/3} \times$$

$$\times \left(\frac{qa}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^m \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{qa} \right)^{\frac{2m+1}{3}} B(m+1; \frac{1}{2}) = \left[\frac{3m-2m-1}{3} = \frac{m-1}{3} \right] =$$

$$= K_i \cdot 2^{-(3m+1)} \cdot 12^{\frac{2m+1}{3}} \cdot V^{\frac{3m+1}{3}} \left(\frac{qa}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^{\frac{m-1}{3}} \cdot B(m+1; \frac{1}{2}) \Rightarrow$$

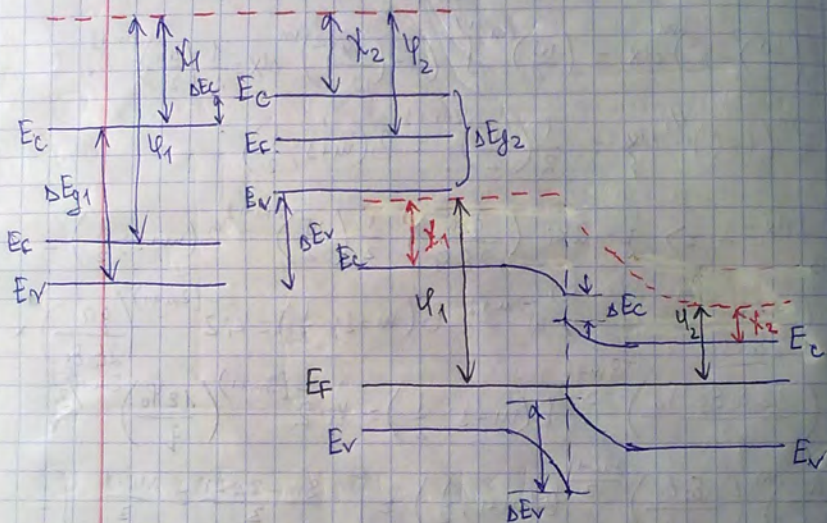
$$\Rightarrow \text{3 выражения } \int = 1 \Rightarrow V^{\frac{3m+1}{3}} = \text{const} \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{qa} \right)^{\frac{m-1}{3}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V = \text{const} \cdot \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{qa} \right)^{\frac{m-1}{2m+1}};$$

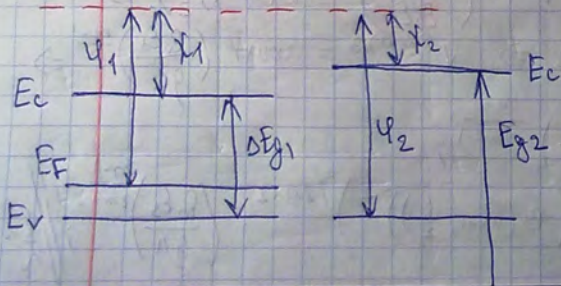
$$V = \left(\frac{2^{3m+1}}{K_i (12)^{(2m+1)/3} \left(B(m+1; \frac{1}{2}) \right)^{-1}} \right)^{3/2m+1} \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{qa} \right)^{\frac{m-1}{2m+1}} \cdot \frac{1}{a} \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{qa}$$

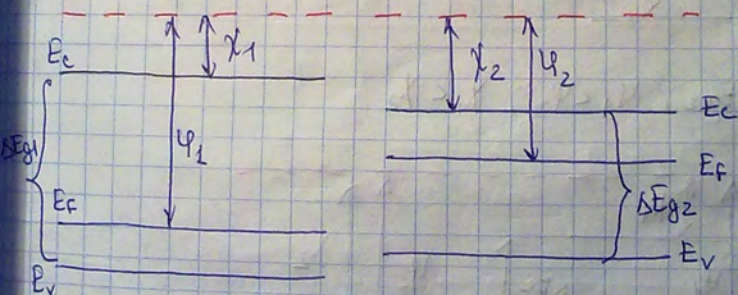
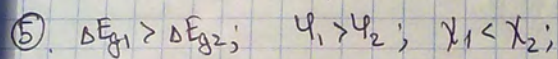
Доопрашування робота №6

- p-n
- ①. $\Delta E_{g1} < \Delta E_{g2}$; $\varphi_1 > \varphi_2$; $\chi_1 > \chi_2$ (в касці)
 - ②. $\Delta E_{g1} < \Delta E_{g2}$; $\varphi_1 > \varphi_2$; $\chi_1 < \chi_2$ (в касці)
 - ③. $\Delta E_{g1} > \Delta E_{g2}$; $\varphi_1 > \varphi_2$; $\chi_1 > \chi_2$



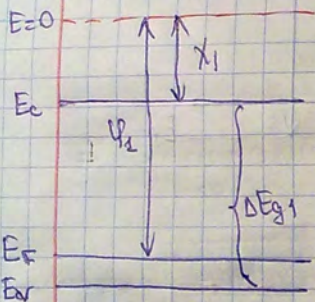
- ④. $\Delta E_{g1} < \Delta E_{g2}$; $\varphi_1 < \varphi_2$; $\chi_1 > \chi_2$



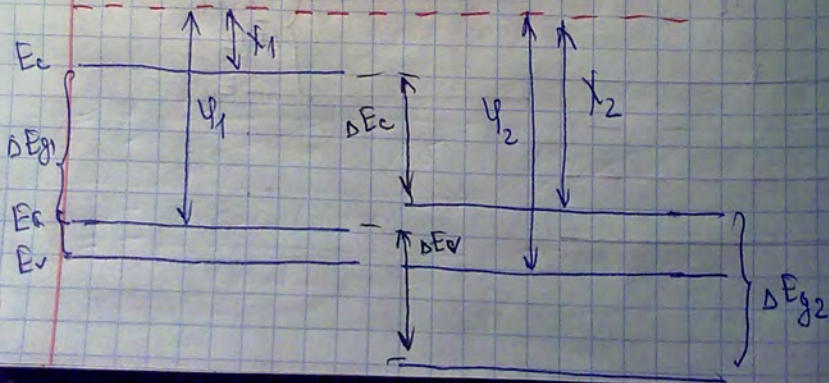


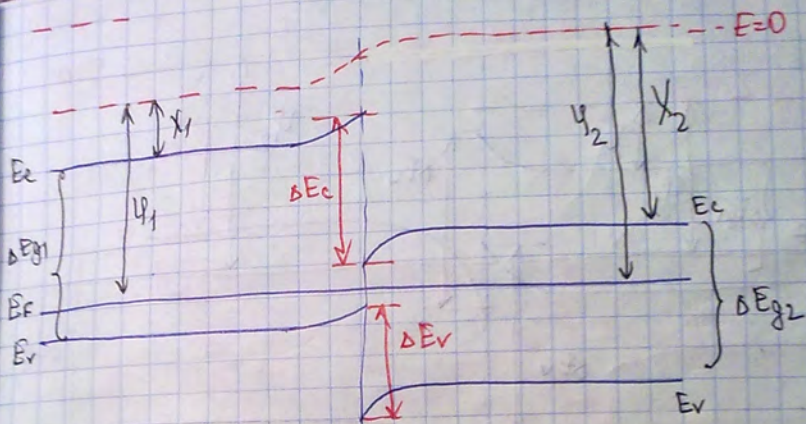


⑥. $\Delta E_{g1} > \Delta E_{g2}$; $\psi_1 < \psi_2$; $\chi_1 > \chi_2$ - неустойчивый

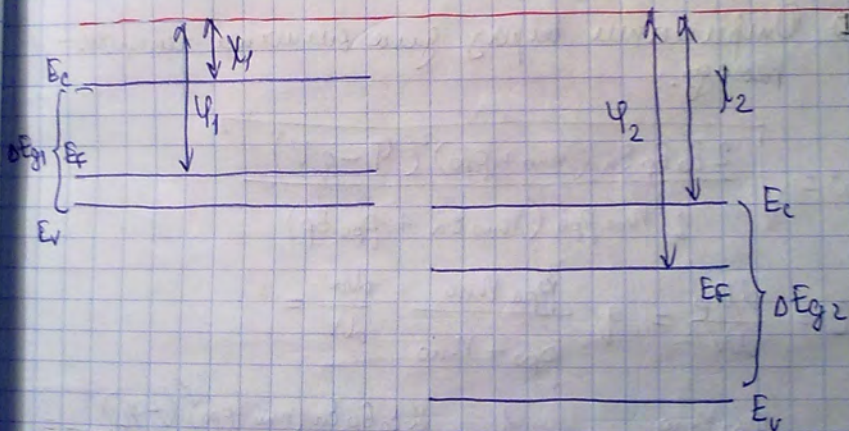


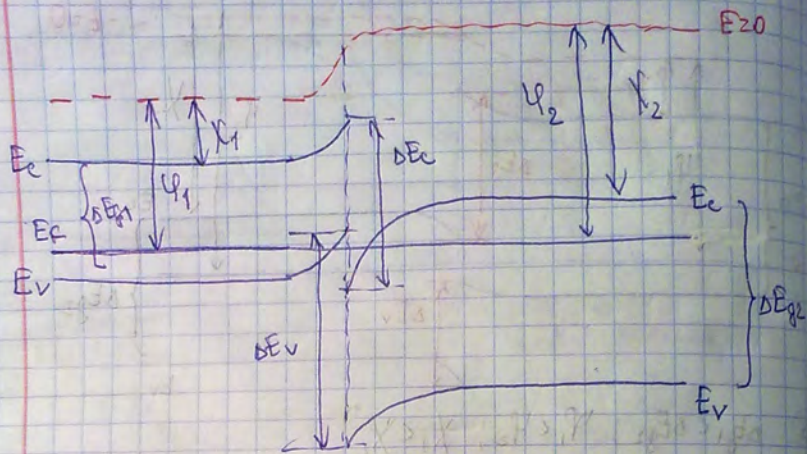
⑦. $\Delta E_{g1} > \Delta E_{g2}$; $\psi_1 < \psi_2$; $\chi_1 < \chi_2$





⑧. $\Delta E_{g1} < \Delta E_{g2}$; $\phi_1 < \phi_2$; $\chi_1 < \chi_2$





① Определить величину функции потерь при изометрическом переходе.

$$W = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_p \epsilon_n (n_{no} + p_{po})^2 (\psi - qV)}{q^2 n_{no} p_{po} (n_{no} \epsilon_n + p_{po} \epsilon_p)}}$$

$$C = \frac{dW}{dV} = q \frac{p_{po} n_{no}}{p_{po} + n_{no}} \frac{dW}{dV} =$$

$$= q \frac{p_{po} n_{no}}{p_{po} + n_{no}} \frac{1}{2W} \frac{2 \epsilon_0 \epsilon_p \epsilon_n (n_{no} + p_{po})^2 (-1)}{q^2 n_{no} p_{po} (n_{no} \epsilon_n + p_{po} \epsilon_p)} =$$

$$C = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_p \epsilon_n (n_{no} + p_{po})}{W (n_{no} \epsilon_n + p_{po} \epsilon_p)}$$

— при изометрическом переходе;

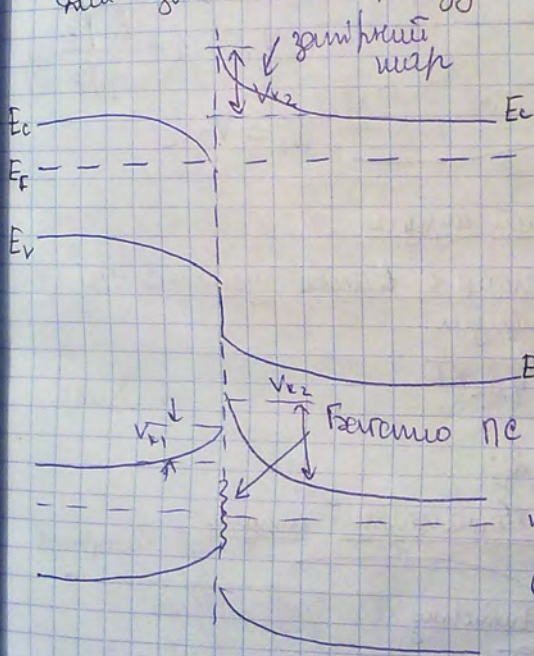
$$\epsilon_{sc} = \epsilon_p = \epsilon_s$$

$$C = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_s \frac{(n_{no} + p_{po})}{\omega \epsilon_s (n_{no} + p_{po})}}{\omega \epsilon_s \frac{(n_{no} + p_{po})}{\omega \epsilon_s (n_{no} + p_{po})}} = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{\omega}$$

$$|C| = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{\omega}$$

18.12.12.

Анализ изоминусного перехода:



$$C = \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_s N_D}{V_{k2} - V}}$$

амплитуда затухающего шага

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

амплитуды затухающего шага
120 мкВ
220 мВ

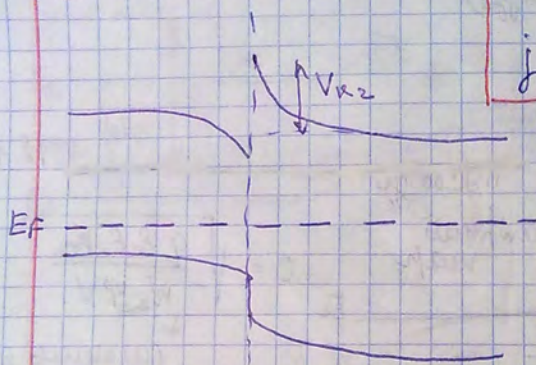
мкВ

$$C_1 = \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_s N_{D1}}{V_{k1} - V_1}}$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_s N_{D2}}{V_{k2} - V_2}}$$

ВАХ гетеропереходу

① Анизотропний



$$j \sim e^{-\frac{qV_{K2}}{kT}} \left(e^{\frac{qV_2}{kT}} - e^{\frac{qV_1}{kT}} \right)$$

$$V_2 = \frac{1}{\gamma_2} \cdot V$$

$$\gamma_2 = 1 + \frac{\epsilon_n \mu_n}{\epsilon_p \mu_p}$$

$$V_1 = V - V_2$$

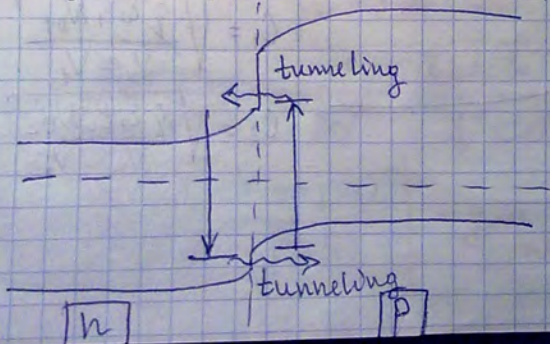
Резонансный туннельный эффект

Если на границе с большой плотностью ПС, то в резонанс: эффект.

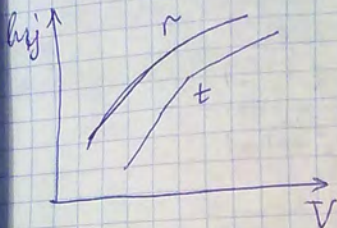
$$J_{\text{res}} \sim e^{\frac{qV}{\gamma_{\text{res}} kT}}$$

$$\gamma_{\text{res}} = 1 \div 2;$$

Туннельно-резонансный эффект



При заданном напряжении будет существовать несколько
возможных значений тока.



перелом - при увеличении g то
уменьш - тогда уменьшится g то

② Изоминный (n-n)

$$j \sim e^{-\frac{qV_{k2}}{kT}} \left(e^{\frac{qV_2}{kT}} - e^{-\frac{qV_1}{kT}} \right)$$

$$V_{k2} \gg V_{k1} \Rightarrow V_{k2} \approx V_k$$

$$V_2 \gg V_1$$

$$j \sim e^{-\frac{qV_k}{kT}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

↓ у бип. транз. невелика

(влияет зона проводимости КРП)

Какая ПС берется то
и в j и в j_{k2} крп?

заданный велич. ток будет в j_{k2} и в j_{k1} крп?

$$I = I_{S2} \left(\exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - 1 \right)$$

$$I = -I_{S1} \left(\exp\left(-\frac{qV_1}{kT}\right) - 1 \right)$$

$$V_2 = V - V_1$$

$$I = I_{S2} \left(e^{\frac{qV}{kT}} \cdot e^{-\frac{qV_1}{kT}} - 1 \right) \left(-\frac{I}{I_{S1}} + 1 \right) = e^{-\frac{qV_1}{kT}} = \frac{I_{S1} - I}{I_{S1}}$$

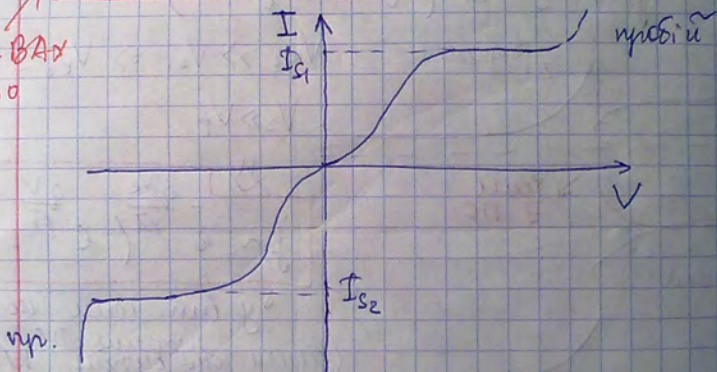
$$\frac{I}{I_{S2}} = e^{\frac{qV}{kT}} \cdot \frac{I_{S1} - I}{I_{S1}} - 1$$

$$I \left(\frac{1}{I_{S2}} + e^{\frac{qV}{kT}} \frac{1}{I_{S1}} \right) = e^{\frac{qV}{kT}} - 1$$

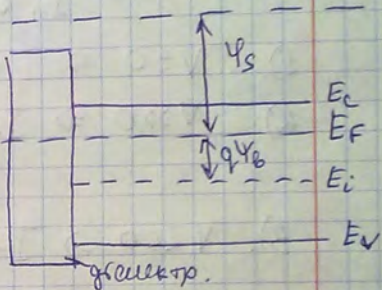
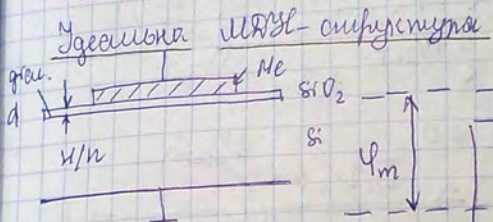
$$I = \frac{I_{S1} I_{S2} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)}{I_{S1} + I_{S2} e^{\frac{qV}{kT}}} \cdot \frac{e^{-\frac{qV}{2kT}}}{e^{-\frac{qV}{2kT}}} =$$

$$I = \frac{I_{S1} I_{S2} (e^{\frac{qV}{2kT}} - e^{-\frac{qV}{2kT}})}{I_{S1} e^{-\frac{qV}{2kT}} + I_{S2} e^{\frac{qV}{2kT}}}$$

Результат:
нобул. ВАХ
при $V > 0$
и $V < 0$



Структура Me-Диэлектрик-SE/n (MDE)



Для идеальной структуры при

① $V=0$ $\psi_{ms} - \psi_m - \psi_s = 0$ -
нет пол. внешнего поля.

② Запас в полупроводнике та на ПЭС зависит от V напряж. замещения.

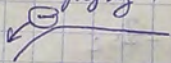
③ Диэлектрик идеальной (нет переноса заряда за пределы - $R_{sc} \rightarrow \infty$).

$$\psi_s = \chi + \frac{\Delta E_g}{2} \mp q\psi_b$$

- для n-n/n
+ для p-n/n

Если приложить напряж.:

-го Me +



1.12.12.

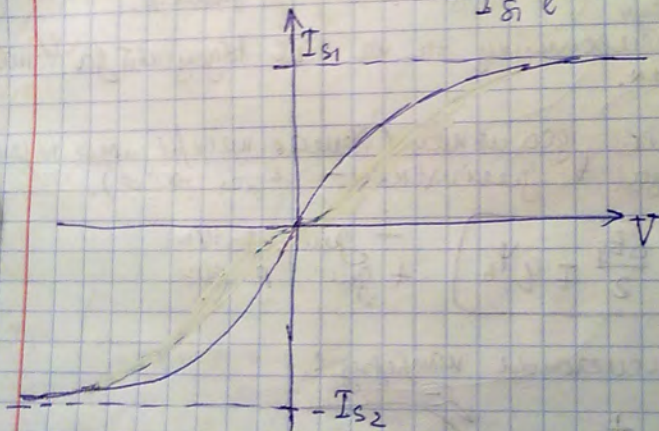
Параметры диода N1

$$I = \frac{I_{S1} I_{S2} \left(\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV}{2kT}\right) \right)}{I_{S1} e^{-\frac{qV}{2kT}} + I_{S2} e^{\frac{qV}{2kT}}};$$

1). $V=0 \Rightarrow I=0$

2). $V \gg 0 \Rightarrow I \rightarrow \frac{I_{S1} I_{S2} (e^{\frac{qV}{2kT}})}{I_{S1} e^{\frac{qV}{2kT}}} \Rightarrow I_{S1}$

3). $V \ll 0 \Rightarrow I \rightarrow \frac{I_{S1} I_{S2} (-e^{-\frac{qV}{2kT}})}{I_{S1} e^{-\frac{qV}{2kT}}} = -I_{S2}$



4). $0 < V < 1$

$$I = \frac{I_{S1} I_{S2} \left(1 + \frac{qV}{2kT} - 1 + \frac{qV}{2kT} \right)}{I_{S1} \left(1 - \frac{qV}{2kT} \right) + I_{S2} \left(1 + \frac{qV}{2kT} \right)}$$

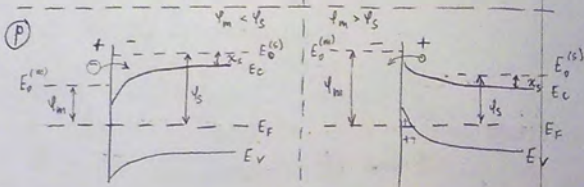
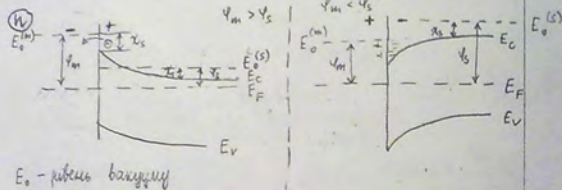
$$= \frac{I_{S1} I_{S2} \cdot \frac{qV}{kT}}{(I_{S1} + I_{S2}) + (I_{S2} - I_{S1}) \frac{qV}{2kT}}$$



КИСЛИЧИН



- ① Накаляем энергетиче-
ски для кривых миним.
и максим. энергии



② 1. Покажем:

$$A^* = \frac{4\pi m_n^* k^2}{h^3} f$$

$$n_0 = N_c e^{-\mu/kT} = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/kT}$$

$$\phi_0 = \phi_0 - \mu$$

$$\frac{f}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_n^*}} \cdot 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/kT} e^{-\phi_0/kT} = \frac{4\pi m_n^* k^2}{h^3} f \cdot T^2 e^{-(\phi_0 + \mu)/kT}$$

②. Дано: $j_{ms} = A^* T^2 e^{-\phi_0/kT}$; $j_{sm} = B \exp(-\frac{\phi_0 - qV}{kT})$

$$j = j_{sm} - j_{ms}$$

Пускай $V = 0 \Rightarrow |j_{sm}| = |j_{ms}| \Rightarrow B = A^* T^2 \Rightarrow$

$$j = A^* T^2 \cdot \exp(-\phi_0/kT) (\exp(qV/kT) - 1)$$

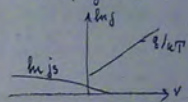
3. Знаям ϕ -чисто $\ln j_s = f(1/T)$ (выразим ϕ_0 через $\ln j_s$)

$$j = j_s (\exp(\frac{qV}{kT}) - 1)$$

$$j_s = A^* T^2 \exp(-\phi_0/kT)$$

$$\ln j_s = \ln A^* + 2 \ln T - \frac{\phi_0}{kT}$$

$$\ln j_s / T^2 = \ln A^* - \frac{\phi_0}{kT}$$



③ Покажем, что $L < 8/kT$ за счет $L_i = 8/kT$,

$$L_i = \frac{q}{kT} \text{ где } i \geq 2$$

$$L_i = \frac{d \ln j_i}{dV} = \frac{1}{j_i} \frac{dj_i}{dV}$$

$$L = \frac{d \ln j}{dV} = \frac{1}{j} \frac{dj}{dV}$$

$$L = \frac{1}{j} \left[L_1 j_1 + \sum_{i=2}^n L_i j_i \right] = L_1 / j \left[j_1 + \sum_{i=2}^n \frac{j_i}{L_1} j_i \right]$$

$$L_1 = 8/kT, L_{i+1} < 8/kT$$

$$L = \frac{1}{j} \left[L_1 j_1 + \sum_{i=2}^n L_i j_i \right] = L_1 / j \left[j_1 + \sum_{i=2}^n \frac{j_i}{L_1} j_i \right]$$

$$L_i = L_1 + \Delta L_i$$

$$\textcircled{=} \frac{L_1}{j} \left[j_1 + \sum_{i=2}^n \left(1 + \frac{\Delta L_i}{L_1} \right) j_i \right] = \frac{L_1}{j} \left[j + \sum_{i=2}^n \frac{\Delta L_i}{L_1} j_i \right] =$$

$$= L_1 \left[1 + \sum_{i=2}^n \frac{\Delta L_i}{L_1} \right]$$

IV

$\forall \Delta \lambda_i < 0$ (оскільки $\lambda_{i+1} < q/kT$)
можемо $[1 + \sum_{i=2}^{\infty} \Delta \lambda_i / \lambda_i] < 1$, отже $\lambda < q/kT$

$$\lambda_1 = q/kT, \quad \lambda_2 = q/(2kT)$$

$$j_1 = j_{s1} \exp(qV/kT), \quad j_2 = j_{s2} \exp(qV/2kT)$$

$$h = (j_{s1} \exp(qV/kT) + j_{s2} \exp(qV/2kT)) \left[\frac{q}{kT} j_{s1} e^{\frac{qV}{kT}} + \frac{q}{2kT} j_{s2} e^{\frac{qV}{2kT}} \right]$$

$$= \frac{q}{2kT} \frac{j_{s1} \exp(qV/kT) (1 + 2j_{s2}/j_{s1} \exp(qV/2kT))}{j_{s2} \exp(qV/2kT) (1 + j_{s1}/j_{s2} \exp(qV/2kT))} =$$

$$= \frac{q}{2kT} \frac{(1 + 2j_{s1}/j_{s2} \exp(qV/2kT))}{(1 + j_{s1}/j_{s2} \exp(qV/2kT))} = \frac{q}{2kT} \left(1 + \frac{j_{s1}/j_{s2} \exp(qV/2kT)}{1 + j_{s1}/j_{s2} \exp(qV/2kT)} \right) =$$

$$= \frac{q}{2kT} \left(1 + \frac{q}{1+x} \right); \text{ нехай } j_{s1} = j_{s2}$$

$$V \rightarrow 0 \rightarrow \lambda \rightarrow \frac{3}{4} \frac{q}{kT}$$

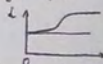
$$V \rightarrow \infty \rightarrow \lambda \rightarrow \frac{q}{kT}$$

$$\lambda = \frac{q}{2kT} \left(1 + \frac{1}{1 + \exp(-qV/2kT)} \right) = \frac{q}{2kT} \left(1 + \frac{1}{1 + \exp(-qV/2kT)} \right)$$

$$\frac{d\lambda}{dV} = \frac{q}{2kT} \frac{1}{(1 + \exp(-qV/2kT))^2} = \frac{q}{2kT} \exp(-\frac{qV}{2kT})$$

$$V \rightarrow 0 \rightarrow \frac{d\lambda}{dV} = \frac{1}{4} \cdot \frac{q^2}{(kT)^2} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{16} \frac{q^2}{(kT)^2} \lambda'$$

$$V \rightarrow \infty \rightarrow \lambda' \rightarrow 0$$



4) Вив'ячимо рівняння Пуассона для неоднорідного розподілу зарядів.

$$\left| \frac{\psi_1''}{\psi_1'} = \frac{q^2 n_0}{\epsilon_0 \epsilon_0} = N \quad x \in (0; l) \right.$$

$$\left| \frac{\psi_2''}{\psi_2'} = \frac{q^2 n_0}{\epsilon_0 \epsilon_0} = N \quad x \in (l; w) \right.$$

$$\frac{d\psi_1}{dx} = kN x + b_1; \quad \frac{d\psi_2}{dx} = N x + b_2; \quad b_2 = -Nw$$



IV

1-ша умова зшивки для носіїв:

$$kN \psi_0 + b_1 = N \psi_0 + b_2 = N \psi_0 + (-Nw)$$

$$kN \psi_0 + b_1 = N(\psi_0 - w)$$

$$b_1 = N(\psi_0(1-k) - w)$$

$$\psi_1(x) = \frac{q}{2} N x^2 + b_1 x + c_1$$

$$\psi_2(x) = \frac{q}{2} N x^2 + b_2 x + c_2$$

$$\psi_1(0) = \psi_2(0) \Rightarrow c_1 = c_2 = \psi_0$$

$$\psi_1(l) = \psi_2(l) \Rightarrow \frac{q}{2} N l^2 + N(\psi_0(1-k) - w)l + \psi_0 = \frac{q}{2} N l^2 + N(\psi_0(1-k) - w)l + \psi_0 = \frac{q}{2} N l^2 + N(\psi_0(1-k) - w)l + \psi_0$$

$$k l^2 + 2(\psi_0(1-k) - w)l + 2\psi_0/N = (l-w)^2$$

$$k l^2 + 2\psi_0(1-k)l - 2w l + 2\psi_0 = l^2 - 2lw + w^2$$

$$l^2(k-1) + 2\psi_0(1-k)l + w^2 = w^2$$

$$l^2(1-k) - w^2 = w$$

$$w = \sqrt{l^2(1-k) + w^2} = \sqrt{w_p^2 - l^2(k-1)}$$

$$\psi_1(x) = \frac{q}{2} N x^2 + N(\psi_0(1-k) - w)x + \psi_0$$

$$\psi_1'(x) = kN x + N(\psi_0(1-k) - w) = 0$$

$$kx = w - \psi_0(1-k) = w + \psi_0(k-1)$$

$$x_m = w/k + \psi_0 \left(\frac{k-1}{k} \right) = \psi_0 + w/k - \psi_0/k = \psi_0 + \frac{1}{k}(w - \psi_0)$$

5) Знайдемо V_1 :

$$\frac{(V_1 + V_1')^2}{a_n^2 V_0} - 2 \frac{V_1 + V_1'}{a_n \sqrt{V_0}} = -g(V - V_1)$$

$$\frac{V_1^2}{a_n^2 V_0} + \frac{2V_1 V_1'}{a_n^2 V_0} + \frac{V_1'^2}{a_n^2 V_0} - \frac{2V_1 + 2V_1'}{a_n \sqrt{V_0}} = -\frac{2V_1}{a_n \sqrt{V_0}} - \frac{2V_1'}{a_n \sqrt{V_0}} + \frac{gV}{V_0} - \frac{gV_1}{V_0} = 0$$

$$\frac{(V_1 + V_1')^2}{a_n^2 V_0} - 2 \frac{V_1 + V_1'}{a_n \sqrt{V_0}} + \frac{gV}{V_0} - \frac{g(V_1 + V_1')}{V_0} = 0$$

$$x^2 - 2x - \frac{g}{4} \frac{a_n^2}{V_0} x + \frac{g}{4} (V + V_1') = 0$$

$$x^2 - 2\left(1 + \frac{ga_n^2}{4\sqrt{V_0}}\right)x + \frac{g}{4} (V + V_1') = 0$$

$$x = \left(1 + \frac{ga_n^2}{4\sqrt{V_0}}\right) \pm \sqrt{\left(1 + \frac{ga_n^2}{4\sqrt{V_0}}\right)^2 - \frac{g}{4} (V + V_1')}$$

$$\Rightarrow x = 1 + \frac{ga_n^2}{4\sqrt{V_0}} \pm \sqrt{1 + 2\frac{ga_n^2}{\sqrt{V_0}} + \frac{g^2 a_n^4}{4V_0} - \frac{g}{4} (V + V_1')}$$

$$V_1 = -V_1' + a_n \sqrt{V_0} + \frac{ga_n^2}{2} \pm \sqrt{(a_n \sqrt{V_0} + \frac{ga_n^2}{2})^2 - ga_n^2 (V + V_1')}$$

$$V_2 = -V_1' - a_n \sqrt{V_0} + \frac{ga_n^2}{2} \pm \sqrt{(a_n \sqrt{V_0} + \frac{ga_n^2}{2})^2 - ga_n^2 (V + V_1')}$$