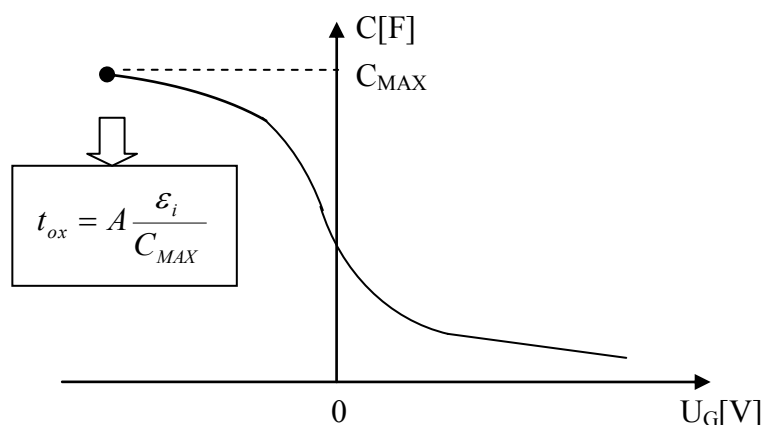


INSTRUKCJA WYKONAWCZA DMOS (ćwiczenie wykonywane zdalnie)

1. Wykreślić charakterystykę pojemnościowo-napięciową wybranej struktury diody tunelowej metal-izolator-półprzewodnik (dane pomiarowe w zakładce CV pliku).
uwaga: przyporządkowanie plików z danymi do studentów podane na stronie przedmiotu PNAN
2. Na podstawie wykreślonej charakterystyki pojemnościowo-napięciowej dokonać ekstrakcji grubości warstwy dielektryka t_{ox} , koncentracji atomów domieszki w podłożu N_A , pojemności w stanie płaskich pasm C_{FB} , napięcia płaskich pasm U_{FB} , ładunku efektywnego tlenku Q_{eff} .

2.1/ Grubość warstwy dielektrycznej (t_{ox}):

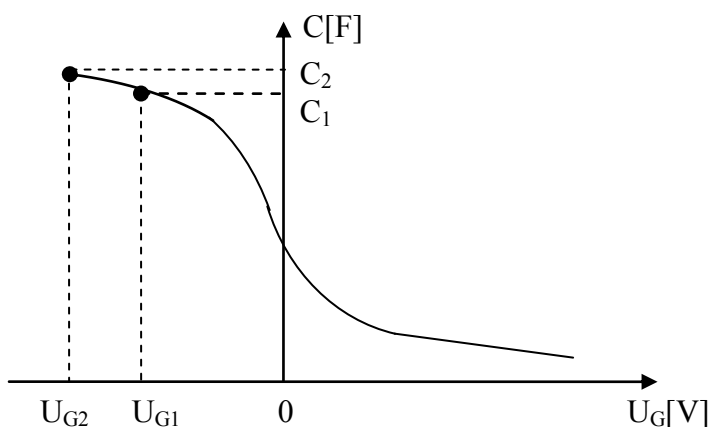
a/ z jednego punktu charakterystyki w zakresie akumulacji (C_{MAX})



gdzie:

A - powierzchnia elektrody bramki (do obliczeń przyjąć $A = 0,0028 \text{ cm}^2$),
 ϵ_i - przenikalność elektryczna izolatora (dla SiO_2 $\epsilon_i = 3,9 \cdot \epsilon_0 = 3,45 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$)

b/ znając dwa punkty charakterystyki w zakresie akumulacji $C_1(U_{G1})$ i $C_2(U_{G2})$.

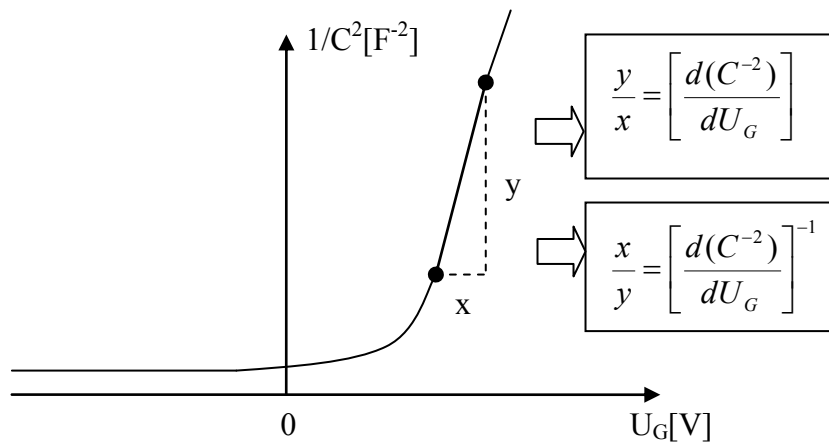


$$C_{MAX} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{kT}{q} \left| \frac{C_2 - C_1}{U_{G2} - U_{G1}} \right| \right) + \sqrt{\left(\frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{kT}{q} \left| \frac{C_2 - C_1}{U_{G2} - U_{G1}} \right| \right)^2 - C_1 C_2}$$

(dla $T=300\text{K}$, $\frac{kT}{q} \cong 26\text{mV}$)

$$t_{ox} = A \frac{\epsilon_i}{C_{MAX}}$$

2.2/ Koncentracji domieszki w podłożu (N_A):



Na podstawie nachylenia krzywej w zakresie zubożenia obliczyć szukaną wartość N_A korzystając z zależności:

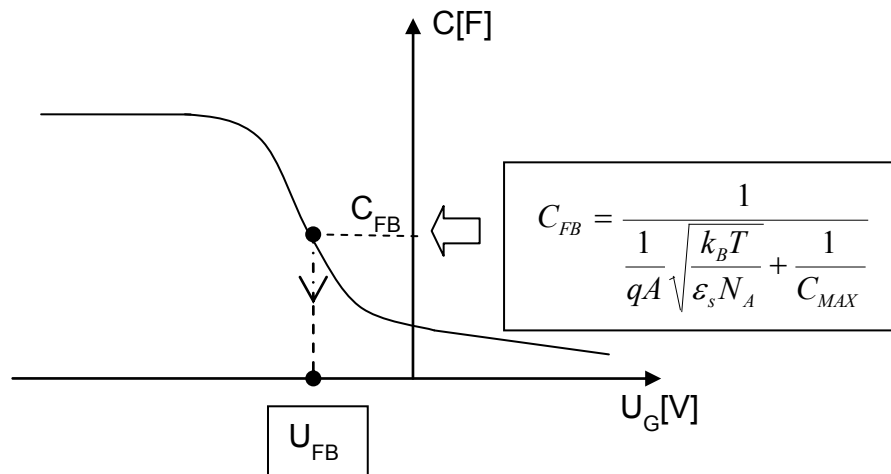
$$N_A = \frac{2}{qA^2 \epsilon_s} \left[\frac{d(C^{-2})}{dU_G} \right]^{-1}$$

gdzie:

q – ładunek elementarny ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C),

ϵ_s – przenikalność elektryczna półprzewodnika (dla Si $\epsilon_s = 11,7 \cdot \epsilon_0 = 10^{-12}$ F/cm)

2.3/ Pojemność w stanie płaskich pasm (C_{FB}), napięcie płaskich pasm (U_{FB}):



gdzie:

q – ładunek elementarny ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C),

k_B – stała Boltzmanna $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

ϵ_s – przenikalność elektryczna półprzewodnika (dla Si $\epsilon_s = 11,7 \cdot \epsilon_0 = 10^{-12}$ F/cm)

2.4/ Ładunek efektywny tlenku (Q_{eff}):

$$Q_{eff} = C_{ox}(\phi_{MS} - U_{FB}) = \frac{\epsilon_i}{t_{ox}}(\phi_{MS} - U_{FB})$$

gdzie

ϵ_i - przenikalność elektryczna izolatora (dla SiO_2 $\epsilon_i = 3,9 \cdot \epsilon_0 = 3,45 \cdot 10^{-13}$ F/cm)

przy czym dla struktury MOS w układzie materiałowym Al-SiO₂-Si(p):

$$\phi_{MS} = \frac{\phi_M - (\chi_s + E_g / 2 - q\phi_F)}{q} = \frac{4,1 - (4,05 + 1,10 / 2 - q\phi_F)}{q} = -0,5 - \phi_F$$

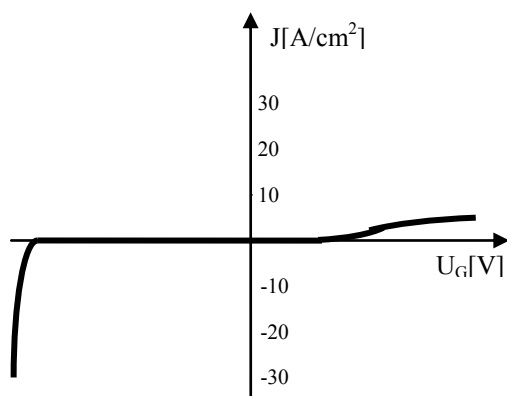
gdzie

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (\text{dla } T=300\text{K: } \frac{kT}{q} \cong 26\text{mV}, n_i=10^{10}\text{cm}^{-3}).$$

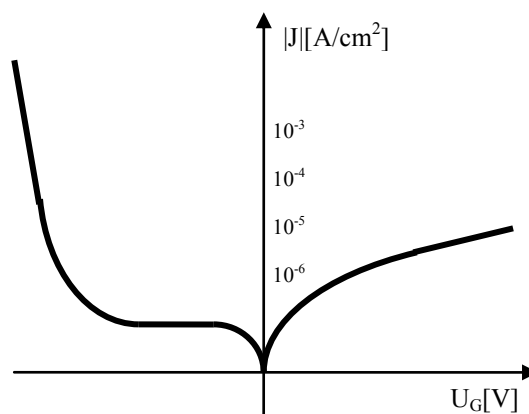
Po dokonaniu podstawień otrzymujemy:

$$Q_{eff} = \frac{\epsilon_i}{t_{ox}}(-0,5 - \phi_F - U_{FB}) = \frac{\epsilon_i}{t_{ox}} \left[-0,5 - \left(0,026 \cdot \ln \frac{N_A}{10^{10}} \right) - U_{FB} \right]$$

3. Obliczyć i wykreślić charakterystykę J-V we współrzędnych liniowych i półlogarytmicznych (dane pomiarowe w zakładce IV pliku).



współrzędne liniowe



współrzędne półlogarytmiczne

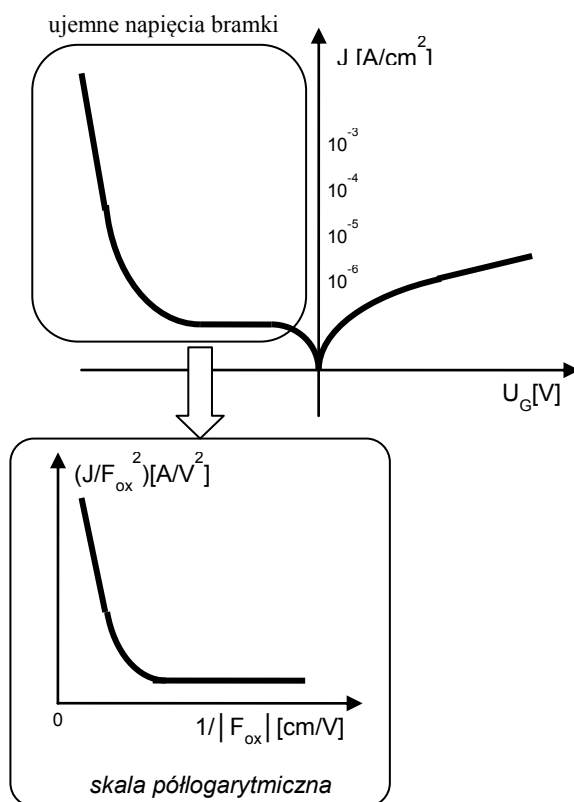
Uwaga: $J=I/A$, gdzie A jest powierzchnią elektrody bramki (do obliczeń przyjąć $A = 0,0028 \text{ cm}^2$),

4. Obliczyć i wykreślić charakterystyki $(|J|) \sim U$ oraz dla zakresu ujemnych napięć bramki $(|J|/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$ - dla obu wykresów należy zastosować skalę półlogarytmiczną.

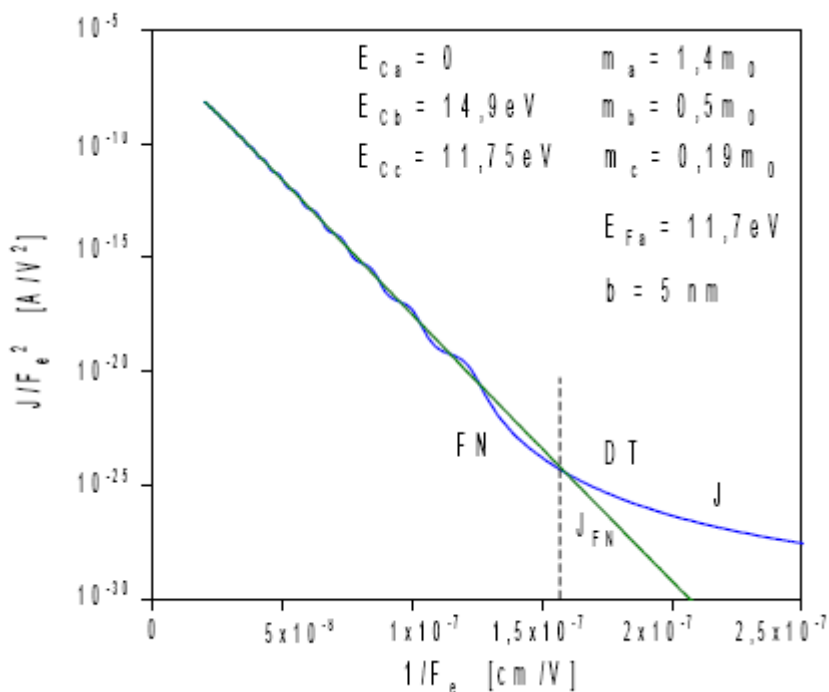
Należy przyjąć, że w stanie akumulacji $U_G = \phi_{MS} + \phi_s + U_{ox} \cong \phi_{MS} + F_{ox} \cdot t_{ox}$, czyli pominąć mały w przypadku stanu akumulacji potencjał powierzchniowy ϕ_s , wówczas:

$$F_{ox} = \frac{U_G - \phi_{MS}}{t_{ox}} = \frac{U_G - (-0,5 - \phi_F)}{t_{ox}} = \frac{U_G - \left(-0,5 - 0,026 \cdot \ln \frac{N_A}{10^{10}}\right)}{t_{ox}}$$

(**Uwaga:** przyjąć wartość t_{ox} [cm] obliczoną w pkt. 2.1b, wartość N_A obliczoną w pkt. 2.2)



5. Wykreśloną charakterystykę $(J/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$ należy porównać z rys. 9 instrukcji ćwiczenia DMOS i znaleźć zakresy odpowiadające tunelowaniu bezpośredniemu (DT) i Fowlera-Nordheima (FN).



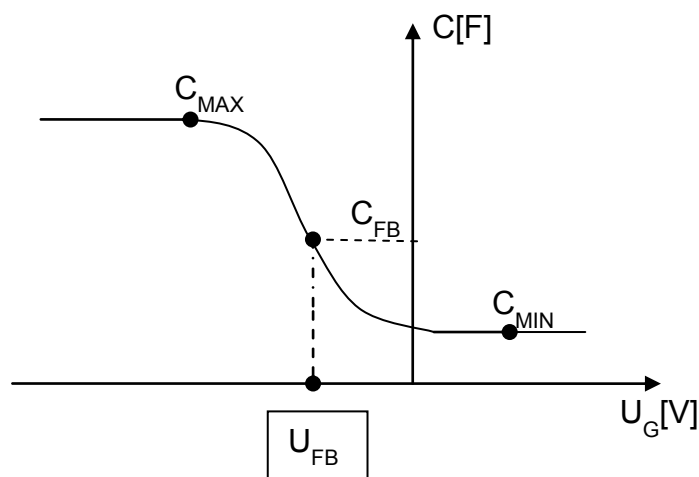
Rys. 9: Wykres Fowlera-Nordheima dla struktury Al-SiO₂-Si (a-b-c).

6. Obliczyć i wykreślić charakterystykę we współrzędnych $\ln(|J|/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$ (dla zakresu ujemnych napięć bramki). Korzystając z wzoru (3) wyznaczyć **wysokość bariery potencjału** (Φ_{mi}) przy założeniu masy efektywnej wynoszącej 0,5.

Komentarz:

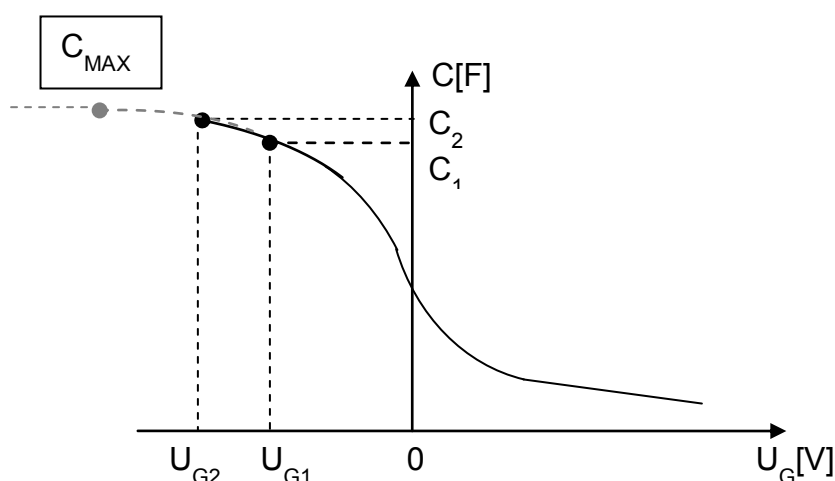
2.1/ Grubość warstwy dielektrycznej (t_{ox})

W przypadku grubych dielektryków charakterystyka C-V wygląda jak na rysunku poniżej (stała wartość pojemności w akumulacji i stała wartość pojemności w zakresie silnej inwersji).



Grubość dielektryka oblicza się wówczas tak jak w pkt. 2.1a, czyli ze wzoru (1): $t_{ox} = A \frac{\epsilon_i}{C_{MAX}}$

W przypadku struktur z relatywnie cieniutkim dielektrykiem zmierzona charakterystyka w zakresie akumulacji często wygląda jak na rysunku poniżej (ciągła czarna linia) tj. nie ma nasycenia krzywej (stałej wartości pojemności) w zakresie akumulacji. Pomiar dla większych wartości napięcia polaryzującego (chodzi o wartości bezwzględne) nie jest możliwy, gdyż nastąpiłoby przebicie dielektryka. Można wówczas korzystając z charakterystyki zmierzonej oszacować maksymalną wartość pojemności (C_{MAX}) jaka odpowiada niezmiernemu zakresowi charakterystyki C-V (szara przerywana linia). Służy do tego wzór podany w pkt. 2.1b.

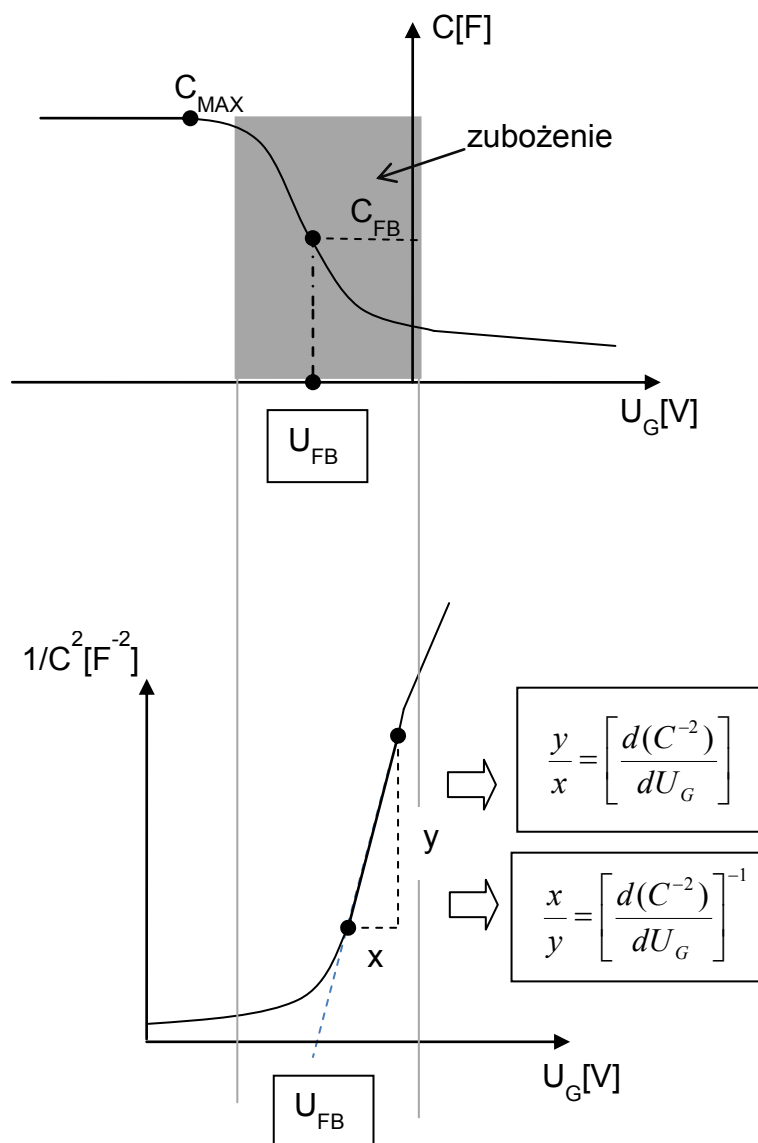


Należy wykonać obliczenia kilkakrotnie, wybierając różne punkty charakterystyki jako $C_1(U_{G1})$ i ostatecznie wybrać ten, dla którego wynik (C_{MAX}) jest najrozsądniejszy.

Spodziewamy się grubości $5 \div 10$ nm. Przy weryfikacji obliczonej grubości proszę pamiętać, że wynik otrzymany z obliczeń w pkt. 2 jest podany w centymetrach tj. 10^{-2} m.

2.2/ Koncentracji domieszki w podłożu (N_A)

Koncentrację atomów domieszki w podłożu określa się na podstawie nachylenia charakterystyki $1/C^2 = f(U_G)$ w zakresie zubożenia, zgodnie z rysunkiem poniżej.



Spodziewamy się koncentracji na poziomie $10^{14} \div 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Jeżeli poprowadzimy prostą przechodzącą przez punkty służące do wyznaczenia nachylenia charakterystyki (zob. rysunek powyżej), czyli ekstrapolujemy liniowy odcinek charakterystyki w kierunku osi napięcia (U_G), to przecięcie tej prostej z osią odciętych wyznaczy napięcie płaskich pasm (U_{FB}), tak jak to zostało przedstawione na rysunku powyżej.

Mogą skorzystać Państwo z tej metody wyznaczania U_{FB} i porównać otrzymany wynik z wartością otrzymaną w punkcie 2.3.- powinny być podobne.

2.3/ Pojemność w stanie płaskich pasm (C_{FB}), napięcie płaskich pasm (U_{FB}):

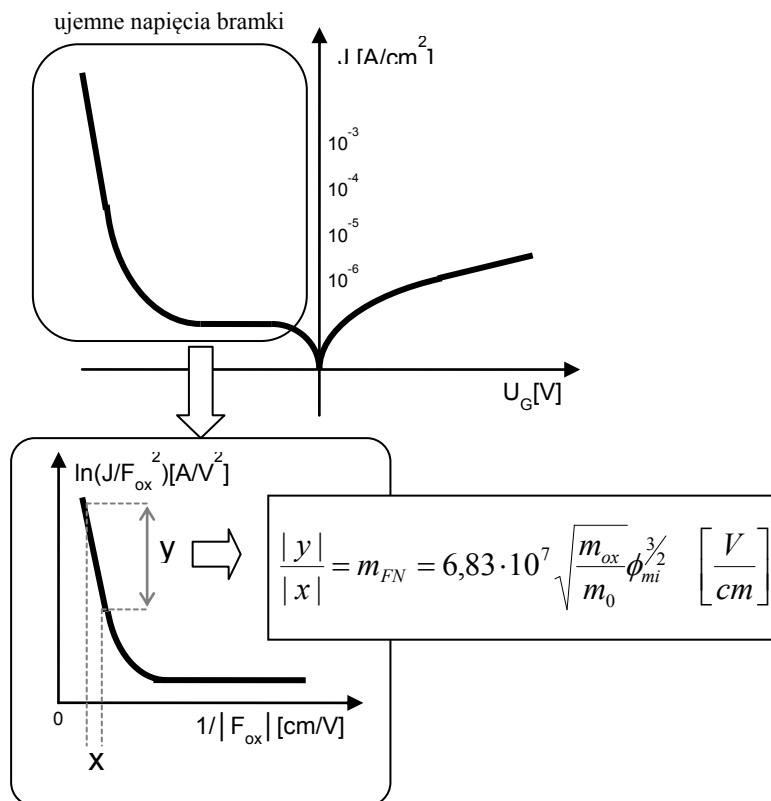
Z podanego wzoru obliczają Państwo C_{FB} (pojemność w stanie płaskich pasm), a następnie odszukujecie tego punktu na zmierzonej charakterystyce i odczytujecie odpowiadające mu napięcie.

5/ Charakterystyka we współrzędnych $(J/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$

Zgodnie z rys. 9: dla małych napięć polaryzujących (mowa o wartościach bezwzględnych) mamy małe natężenie pola elektrycznego wewnątrz dielektryka ($F_{ox}=U/t_{ox}$) i mechanizmem transportu jest tunelowanie bezpośrednie. Dla dużych napięć polaryzujących (mowa o wartościach bezwzględnych), mamy duże natężenie pola elektrycznego wewnątrz dielektryka ($F_{ox}=U/t_{ox}$) i mechanizmem transportu jest tunelowanie Fowlera-Nordheima. Krytyczna wartość natężenia pola (przejście pomiędzy jednym a drugim mechanizmem tunelowania) to $F=6,4\text{MV/cm}$ (fragment instrukcji str. 6). Odpowiada to wartości $1,56 \cdot 10^{-7} [\text{cm/V}]$ na osi odciętych ($1/F_{ox}$). Proszę sprawdzić, czy mają Państwo podobne (niekoniecznie identyczne) wartości na swoich wykresach.

6/ Charakterystyka we współrzędnych Fowlera-Nordheima: $\ln(|J|/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$

Nachylenie charakterystyki (m_{FN} na rys. poniżej) w zakresie tunelowania F-N (liniowy fragment charakterystyki $\ln(|J|/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$), zgodnie ze wzorem 3 instrukcji, można wykorzystać do ekstrakcji (wyznaczenia) wysokości bariery potencjału dla tunelujących nośników (Φ_{mi} na rys. 1 instrukcji).



Zgodnie z poleceniem w instrukcji, do obliczeń należy przyjąć masę efektywną o wartości 0,5, wówczas wzór (3) przyjmuje postać:

$$m_{FN} = 6,83 \cdot 10^7 \sqrt{\frac{m_{ox}}{m_0}} \phi_{mi}^{3/2} = 6,83 \cdot 10^7 \sqrt{0,5} \cdot \phi_{mi}^{3/2} \left[\frac{V}{cm} \right]$$

Reasumując, na podstawie wykresu obliczacie Państwo wartość m_{FN} , a następnie korzystając z powyższego wzoru obliczacie wysokość bariery potencjału dla nośników tunelujących z bramki (Φ_{mi}). Spodziewamy wysokości bariery ok. 2 [eV].