



Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki

Pracownia Podstaw Nanoelektroniki i Nanofotoniki

Ćwiczenie DMOS:

Dioda tunelowa Metal-Izolator-Półprzewodnik

Opracowanie:

dr inż. Andrzej Mazurak

prof. dr hab. Bogdan Majkusiak

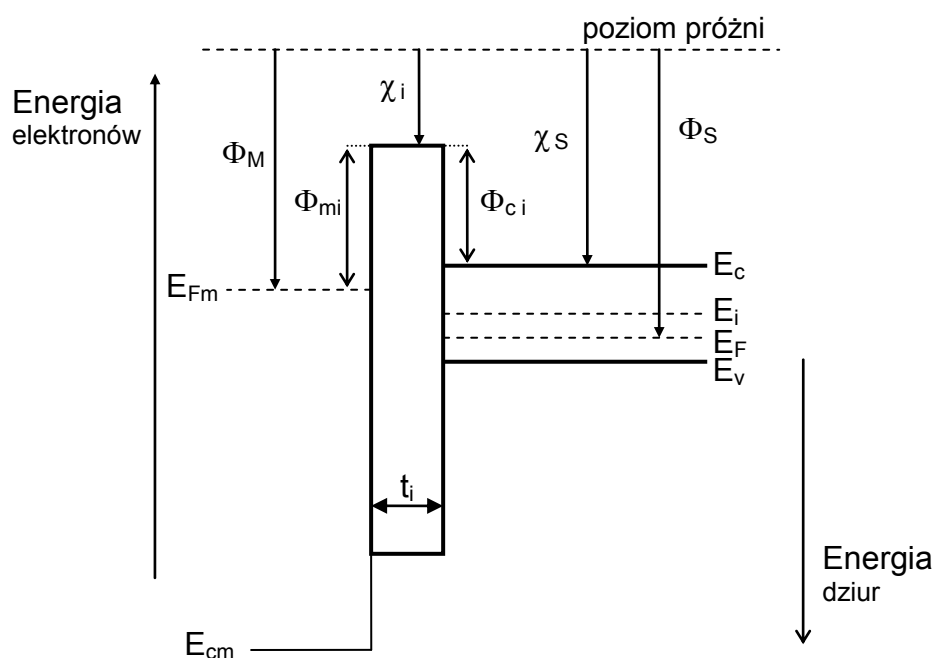
Warszawa, 2019 r.

WSTĘP

W ćwiczeniu badana jest dioda tunelowa MOS - struktura metal-izolator-półprzewodnik z warstwą izolatora na tyle cienką, że możliwe jest efektywne tunelowanie elektronów lub dziur, będące przyczyną przepływu prądu tunelowego między półprzewodnikowym podłożem i elektrodą bramki. Struktura tunelowa MOS stanowi część bardziej złożonych przyrządów półprzewodnikowych, przede wszystkim pamięci nieulotnych z pływającą bramką, oraz różnego rodzaju tranzystorów tunelowych.

DIODA TUNELOWA MOS

Na rys. 1 przedstawiono model pasmowy struktury metal-izolator-półprzewodnik w stanie płaskich pasm przy założeniu idealnych, pozbawionych ładunków elektrycznych powierzchni granicznych.

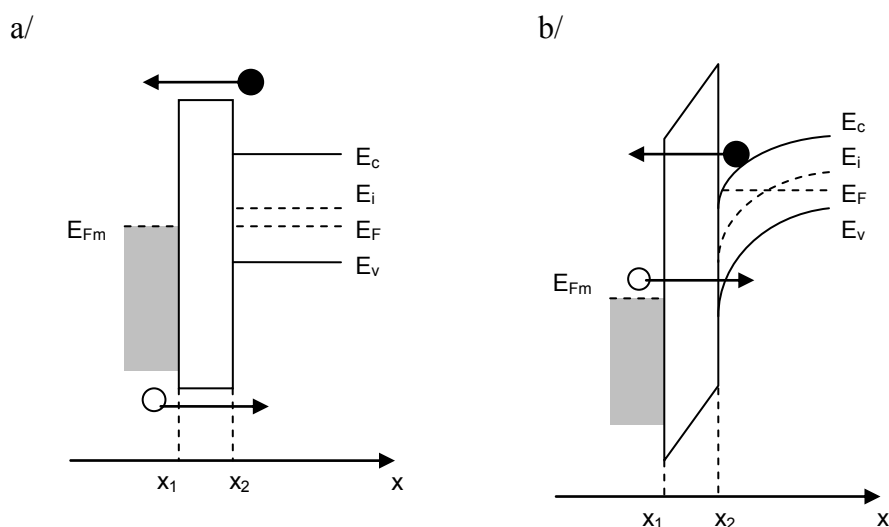


Rys. 1: Poglądowy model pasmowy struktury MOS w stanie płaskich pasm.

Przerwa zabroniona izolatora stanowi barierę potencjału rozdzielającą elektrony w paśmie przewodnictwa i paśmie walencyjnym półprzewodnika od pasma przewodnictwa materiału bramki. Wysokość bariery potencjału dla elektronów $\phi_{ci} = \chi_c - \chi_i$ wyznaczona jest przez różnicę powinowactwa elektronowego półprzewodnika χ_c i izolatora χ_i . W ogólności możliwe są aktywowane temperaturą przejścia nadbarierowe (rys. 2a), ale w przypadku układu materiałowego SiO₂/Si są one mało prawdopodobne z uwagi na wysoką barierę potencjału $\phi_{ci} = 4,05 \text{ eV} - 0,90 \text{ eV} = 3,15 \text{ eV}$. Jednakże jeśli grubość warstwy SiO₂ jest rzędu pojedynczych nanometrów (umownie poniżej 6 nm), prawdopodobne są przejścia tunelowe (rys. 2b) - prawdopodobieństwo tunelowania zależne jest wykładniczo od energii elektronów i od zależnego pola elektrycznego w warstwie kształtu bariery. Tunelowanie elektronów między pasmem walencyjnym i elektrodą bramki można rozważać jako tunelowanie dziur w kierunku przeciwnym.

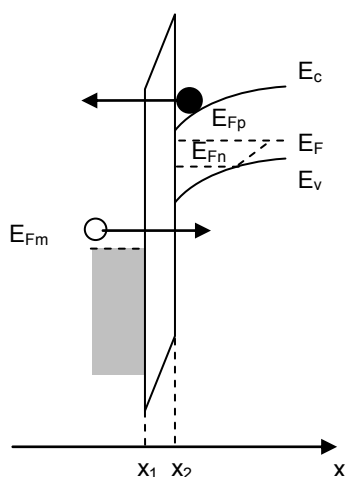
Jeśli grubość warstwy SiO₂ jest większa od około 3 nm, prąd tunelowy nośników mniejszościowych (elektronów w przypadku przedstawionym na rys. 2b) jest na tyle mały, że nie jest w stanie wyprowadzić je z przypowierzchniowego obszaru półprzewodnika znajdującego się przy ujemnych napięciach w stanie silnej inwersji – obszar półprzewodnika

znajduje się w stanie quasi-równowagi termodynamicznej opisanej przez poziomo przebiegający poziom Fermiego, wspólny zarówno dla elektronów jak i dla dziur. Diode tunelową MOS tego rodzaju nazywa się diodą równowagową.



Rys. 2: Transport nośników: (a) ponadbarierowy, (b) tunelowy.

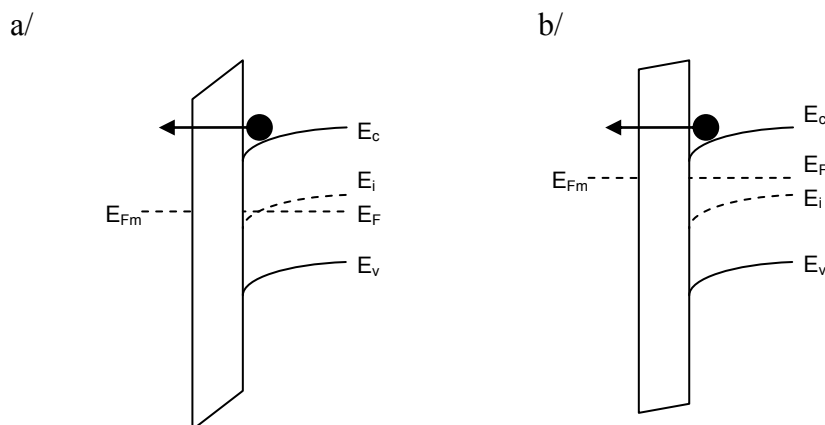
Gdy grubość warstwy SiO_2 jest mniejsza od około 3 nm, tunelowanie nośników mniejszościowych staje się bardziej efektywne od procesów generacji termicznej doprowadzających je do obszaru przypowierzchniowego półprzewodnika, w wyniku czego stan quasi-równowagi termodynamicznej w tym obszarze zostaje istotnie zakłócony. Odzwierciedleniem stanu silnej nierównowagi jest rozszczepienie quasi-poziomów Fermiego elektronów E_{Fn} i dziur E_{Fp} w przy powierzchni półprzewodnika (rys. 3) – w takim przypadku mamy do czynienia z nierównowagową diodą tunelową MOS.



Rys. 3: Dioda nierównowagowa MOS.

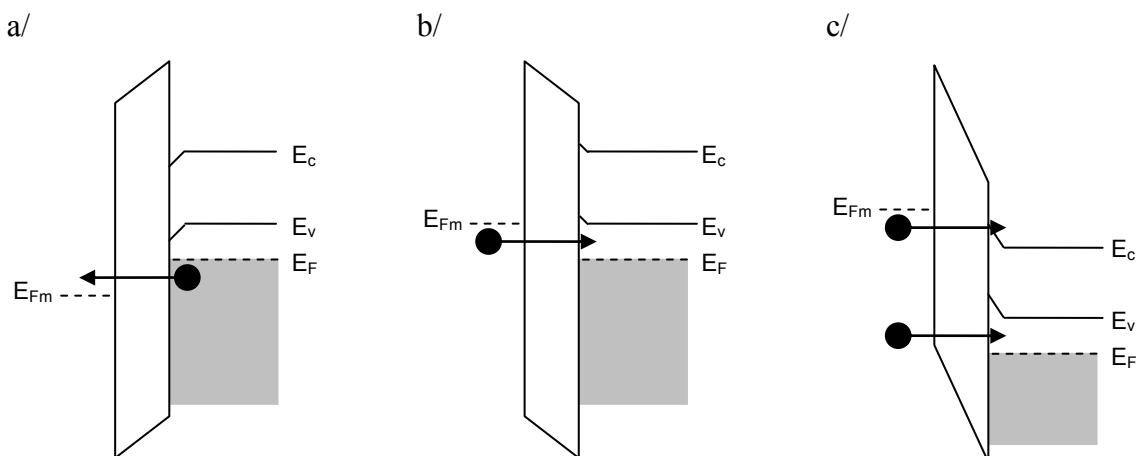
Zależnie od tego, czy dominujący udział w prądzie tunelowym dla polaryzacji diody bliskiej 0 V mają nośniki mniejszościowe czy większościowe, wprowadza się podział na diody mniejszościowe i większościowe. Na przykład dla układu materiałowego Al-SiO₂-Si w przypadku ujemnej wartości kontaktowej różnicy potencjału metal-półprzewodnik (ϕ_{ms}) w przypadku podłoża typu p przy niewielkich napięciach polaryzujących strukturę

przypowierzchniowy obszar podłoża znajduje się w stanie inwersji i w prądzie całkowitym dominuje prąd nośników mniejszościowych (rys. 4a). Natomiast w przypadku podłoża typu n mamy stan akumulacji i o wartości prądu tunelowego decyduje tunelowanie nośników większościowych (rys. 4b). Struktura z rys. 1 dla warstwy SiO_2 o grubości rzędu ułamków nanometra wykazuje cechy złącza metal-półprzewodnik z barierą Schottky'go i stąd nazywana jest diodą Schottky'go.



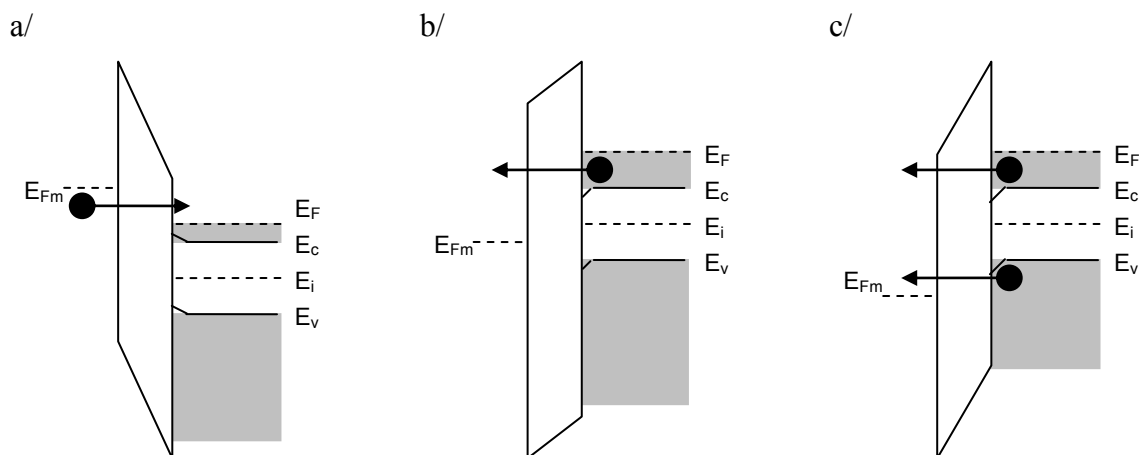
Rys. 4: Dioda równowagowa MOS: mniejszościowa (a), większościowa (b).

W przypadku wysokodomieszkowanego podłoża typu p przy dodatnim napięciu przyłożonym do bramki elektrony z pasma walencyjnego podłoża półprzewodnikowego tunelują do bramki (rys. 5a). W przypadku niewielkich napięć ujemnych elektrony z bramki tunelują do nieobsadzonych stanów energetycznych w paśmie walencyjnym podłoża (rys. 5b). Wraz ze wzrostem ujemnego napięcia polaryzującego bramkę pojawiają się w bramce elektrony o energii wystarczającej dla tunelowania do pasma przewodnictwa półprzewodnika (rys. 5c).



Rys. 5: Dioda tunelowa Al-SiO₂-Si(p⁺): $U_G > 0$ (a), $U_G < 0$ (b), $U_G << 0$ (c).

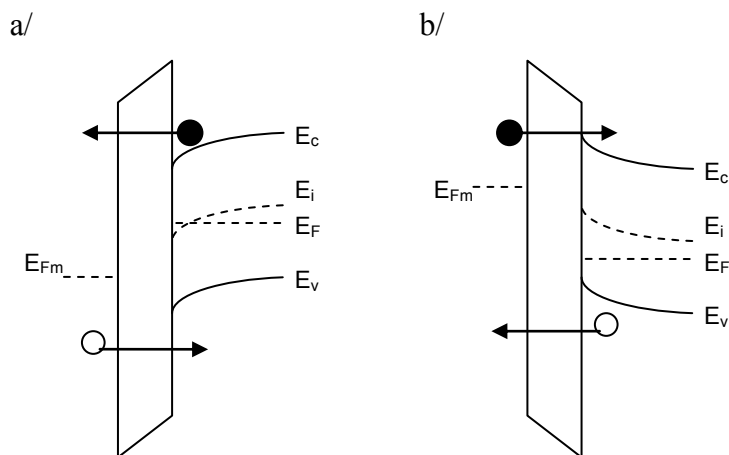
W przypadku wysokodomieszkowanego podłoża typu n przy ujemnym napięciu przyłożonym do bramki elektrony z bramki tunelują do pasma przewodnictwa półprzewodnika (rys. 6a). Przy polaryzacji napięciem dodatnim następuje tunelowanie elektronów z pasma przewodnictwa podłoża do bramki (rys. 6b). Dla dostatecznie dużych napięć dodatnich zachodzi również tunelowanie elektronów z pasma walencyjnego (rys. 6c).



Rys. 6: Dioda tunelowa Al-SiO₂-Si(n⁺): $U_G < 0$ (a), $U_G > 0$ (b), $U_G \gg 0$ (c).

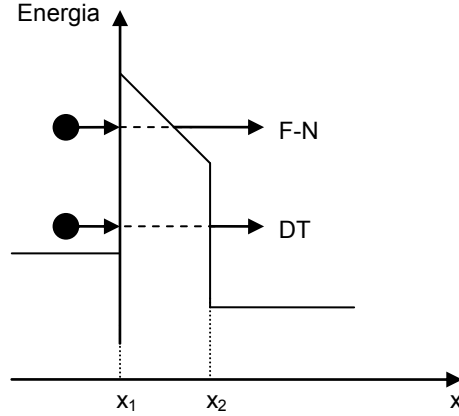
W przypadku niskodopieszczonego podłoża typu p przyłożenie dodatniego napięcia do elektrody bramki spowoduje tunelowanie elektronów z pasma przewodnictwa półprzewodnika do bramki oraz tunelowanie dziur z bramki do pasma walencyjnego półprzewodnika (rys. 7a). Przeciwna polaryzacja struktury spowoduje tunelowe przejścia dziur z pasma walencyjnego podłoża do bramki i tunelowanie elektronów z bramki do pasma przewodnictwa półprzewodnika (rys. 7b).

W rzeczywistych strukturach pojawia się ponadto składowa prądu związana z ładowaniem bądź rozładowywaniem energetycznych stanów pułpkowych zlokalizowanych geometrycznie w płaszczyźnie granicznej podłoża dielektryk, na poziomach energetycznych odpowiadających przerwie zabronionej półprzewodnika.



Rys. 7: Dioda tunelowa Al-SiO₂-Si(p): $U_G > 0$ (a), $U_G < 0$ (b).

Zależnie od energii elektronu i polaryzacji struktury (kształtu bariery) możemy mieć do czynienia z tunelowaniem bezpośrednim DT (*direct tunneling*) (tunelowanie z poziomu Fermiego przez trapezową barierę potencjału) lub tunelowaniem Fowlera-Nordheima FN (tunelowanie przez trójkątną barierę potencjału) - rys. 8.



Rys. 8: Tunelowanie przez trójkątną i trapezową barierę potencjału.

W literaturze podaje się następującą zależność opisującą gęstość tunelowego prądu Fowlera-Nordheima:

$$J_{FN} = \frac{q^3 F_{ox}^2}{16\pi^2 \hbar \phi_{mi}} \frac{m_g}{m_{ox}} \exp \left[-\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m_{ox}}}{\hbar} \frac{\phi_{mi}^{3/2}}{q|F_{ox}|} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- F_{ox} - natężenie pola elektrycznego w obszarze bariery potencjału (tlenku),
- m_{ox} - masa efektywna elektronów w obszarze bariery potencjału (tlenku),
- m_g - masa efektywna elektronów w obszarze bariery emitującym elektrony (bramce) - dla bramki aluminiowej $m_g = 1,4m_0$.
- ϕ_{mi} - średnia wysokość bariery potencjału dla tunelujących elektronów, liczona od poziomu Fermiego w elektrodzie bramki do dna pasma przewodnictwa izolatora.

W układzie współrzędnych Fowlera-Nordheima:

$$\ln\left(\frac{J_{FN}}{F_{ox}^2}\right) \leftrightarrow \frac{1}{F_{ox}} \quad (2)$$

punkty pomiarowe w zakresie dominującego tunelowania przez trójkątną barierę potencjału powinny układać się na prostej o nachyleniu:

$$m_{FN} = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m_{ox}}}{\hbar} \frac{\phi_{mi}^{3/2}}{q} = 6,83 \cdot 10^7 \sqrt{\frac{m_{ox}}{m_0}} \phi_{mi}^{3/2} \left[\frac{V}{cm} \right] \quad (3)$$

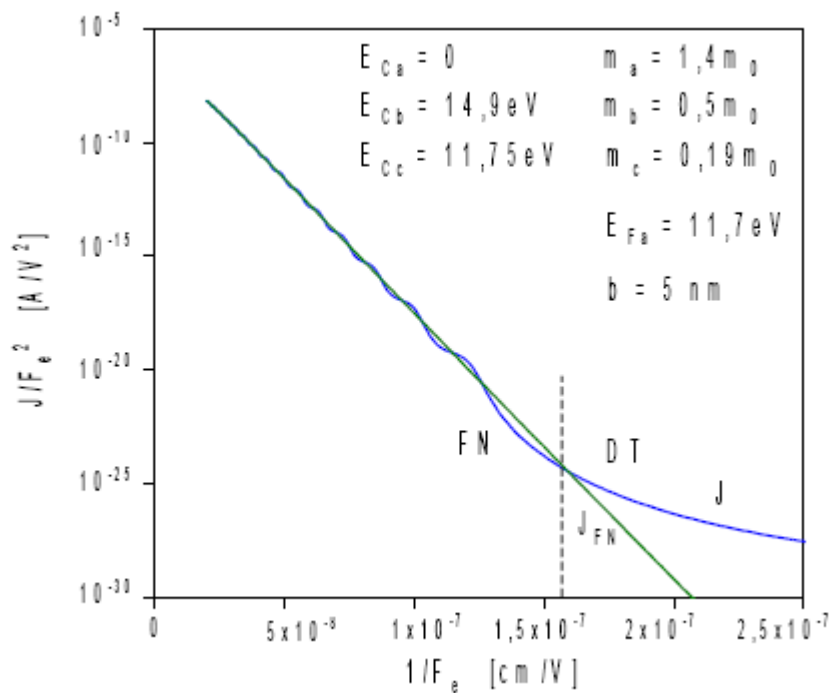
przecinającej oś rzędnych w punkcie:

$$C_{FN} = \frac{q^3}{16\pi^2 \hbar \phi_{mi}} \frac{m_g}{m_{ox}} = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{m_g}{m_{ox}} \frac{1}{\phi_{mi}} \left[\frac{A}{V^2} \right] \quad (4)$$

W przypadku struktur Al-SiO₂-Si dominującym mechanizmem przewodnictwa w warstwie dielektrycznej jest tunelowy transport elektronów.

Na rys. 9 przedstawiono wykres Fowlera-Nordheima policzony dla struktury Al-SiO₂-Si (a-b-c) o grubości warstwy SiO₂ $t_{ox}=b=5\text{nm}$ i wysokości bariery potencjału $\phi_{mi} = E_{Cb}-E_{Fa} = 3.2\text{ eV}$. Dla natężeń pola w zakresie $F_{ox} < \phi_{mi}/t_{ox} = 6,4\text{ MV/cm}$ dominuje tunelowanie z poziomu Fermiego w metalu bezpośrednio do pasma przewodnictwa krzemu (tunelowanie bezpośrednie DT), natomiast dla $F_{ox} > \phi_{mi}/t_{ox} = 6,4\text{ MV/cm}$ dominuje tunelowanie z poziomu Fermiego w metalu do pasma przewodnictwa SiO₂ przez trójkątną barierę potencjału (tunelowanie FN) i punkty dążą do prostej opisanej zależnością powyżej.

Oscylacje prądu tunelowego Fowlera-Nordheima wokół prostej wynikają z kwantowo-mechanicznej interferencji elektronowych funkcji falowych w obszarze SiO₂ wielokrotnie odbijanych od płaszczyzn nieciągłości potencjału końca bariery SiO₂/Si i jej początku Al/SiO₂ – wzór na prąd tunelowy Fowlera-Nordheima obowiązuje przy założeniu, że obszar liniowo malejącego potencjału bariery rozciąga się bez ograniczenia.



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

INSTRUKCJA WYKONAWCZA

1. Wykonać pomiar i wykreślić charakterystykę pojemnościowo-napięciową wybranej struktury diody tunelowej metal-izolator-półprzewodnik.
2. Na podstawie zmierzonej 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} .

Grubość warstwy dielektrycznej należy obliczyć korzystając z zależności:

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

gdzie,

A - powierzchnia elektrody bramki,

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

Należy przeprowadzić obliczenia dla C_{MAX} wyznaczonego:

(a) z jednego punktu charakterystyki w zakresie akumulacji,

(b) z dwóch punktów charakterystyki w zakresie akumulacji korzystając z zależności:

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

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

W celu określenia koncentracji domieszki w podłożu N_A należy wykreślić krzywą $1/C^2 = f(U_G)$, a następnie 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 $\epsilon_s = 11,7\epsilon_0 = 10^{-12}$ F/cm)

Pojemność w stanie płaskich pasm dana jest wzorem:

$$C_{FB} = \frac{1}{\frac{1}{qA} \sqrt{\frac{k_B T}{\epsilon_s N_A}} + \frac{1}{C_{MAX}}}$$

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

Po obliczeniu pojemności C_{FB} należy odczytać z charakterystyki C-V odpowiadające jej napięcie U_{FB} oraz oszacować ładunek efektywny tlenku Q_{eff} przyjmując:

$$U_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{eff}}{C_{ox}}$$

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

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

3. Wykonać pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej wybranej struktury.
4. Obliczyć i wykreślić charakterystykę J-V we współrzędnych liniowych i półlogarytmicznych.
5. Obliczyć i wykreślić charakterystyki $\ln(J) \sim U$ oraz dla zakresu ujemnych napięć bramki $\ln(J/F_{ox}^2) - 1/F_{ox}$.
Należy przyjąć, że w stanie akumulacji $U_G = \phi_{MS} + \phi_s + U_{ox} \cong \phi_{MS} + F_{ox}t_{ox}$, czyli pomijając mały w przypadku stanu akumulacji potencjał powierzchniowy ϕ_s .
6. Korzystając z wzoru (3) wyznaczyć wysokość bariery potencjału przy założeniu masy efektywnej wynoszącej 0,5.
7. Korzystając z programu *MOSdiode.exe* zasymulować charakterystyki pojemnościowo-napięciową i prądowo-napięciową diody tunelowej metal-izolator-półprzewodnik uwzględniając parametry struktury obliczone w poprzednich punktach ćwiczenia.
8. Porównać wyniki symulacji z danymi pomiarowymi. W przypadku znaczących rozbieżności zmodyfikować parametry struktury w celu uzyskania dobrego dopasowania wyników symulacji do danych pomiarowych.

Literatura:

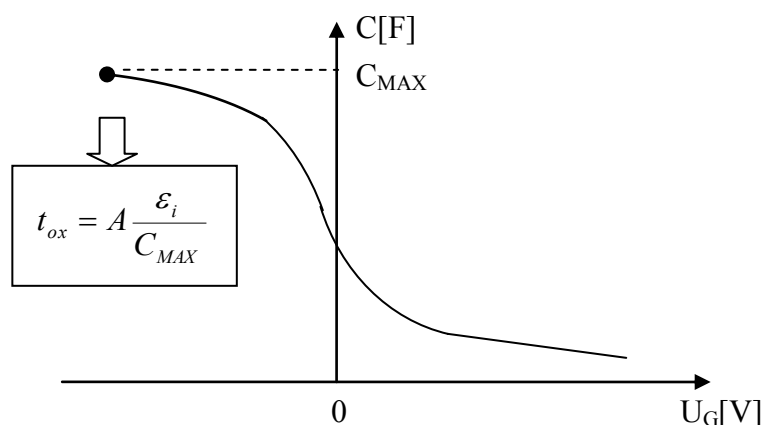
- B. Majkusiak „Podstawy Nanoelektroniki i Nanofotoniki” - materiały z wykładu,
- B. Majkusiak „Podstawy fizyczne nanoelektroniki” - materiały z wykładu,
- M. Marciniak „Przrządy półprzewodnikowe MOS”, WNT.

Załącznik

1. Wykreślić charakterystykę pojemnościowo-napięciową wybranej struktury diody tunelowej metal-izolator-półprzewodnik (dane pomiarowe w pliku: **CV_?.xls**).
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}):

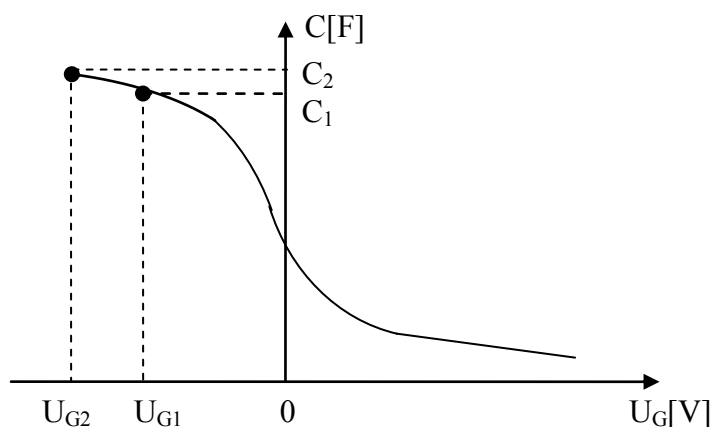
a/ z jednego punktu charakterystyki w zakresie akumulacji (C_{MAX})



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 $C_2(U_{G2})$.

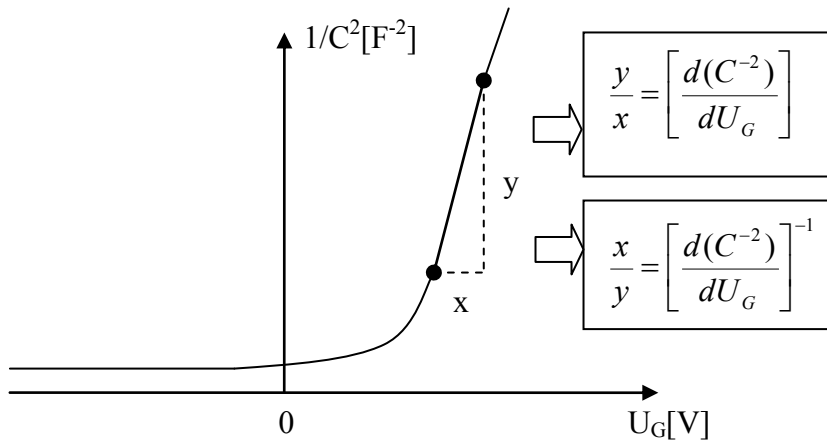


$$C_{MAX} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{kT}{q} \left| \frac{C_2 - C_1}{U_{G2} - U_{G1}} \right| \right) + \sqrt{\left(\frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{kT}{q} \left| \frac{C_2 - C_1}{U_{G2} - U_{G1}} \right| \right)^2 - C_1 C_2}$$

(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:

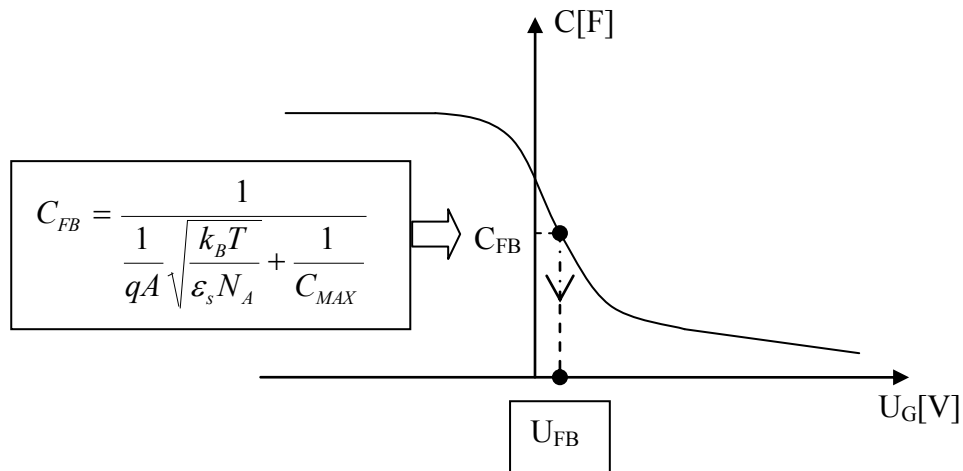
$$N_A = \frac{2}{qA^2 \varepsilon_s} \left[\frac{d(C^{-2})}{dU_G} \right]^{-1}$$

gdzie:

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

ε_s - przenikalność elektryczna półprzewodnika (dla Si $\varepsilon_s = 11,7 \cdot \varepsilon_0 = 10^{-12}$ 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 $\varepsilon_s = 11,7 \cdot \varepsilon_0 = 10^{-12}$ 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):

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

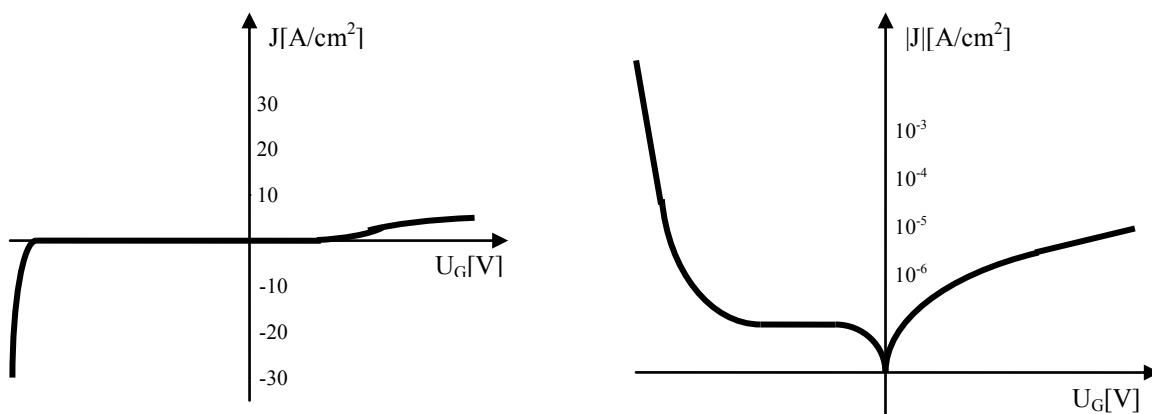
gdzie

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

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 pliku: **IV_?.xls**).



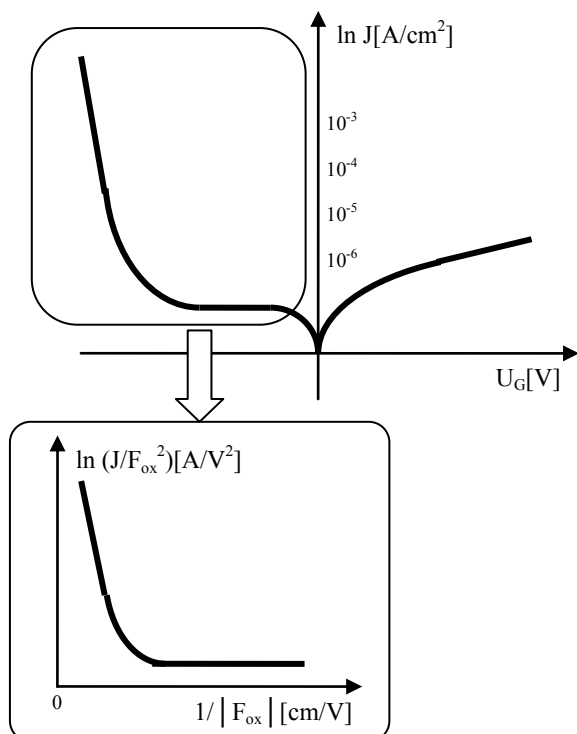
Uwaga: $J=I/A$, gdzie A jest powierzchnią elektrody bramki (do obliczeń przyjąć $A = 0,0028 \text{ cm}^2$),

4. Obliczyć i wykreślić charakterystyki $\ln(|J|) \sim U$ oraz dla zakresu ujemnych napięć bramki $\ln(|J|/F_{ox}^2) \sim 1/|F_{ox}|$.

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)



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