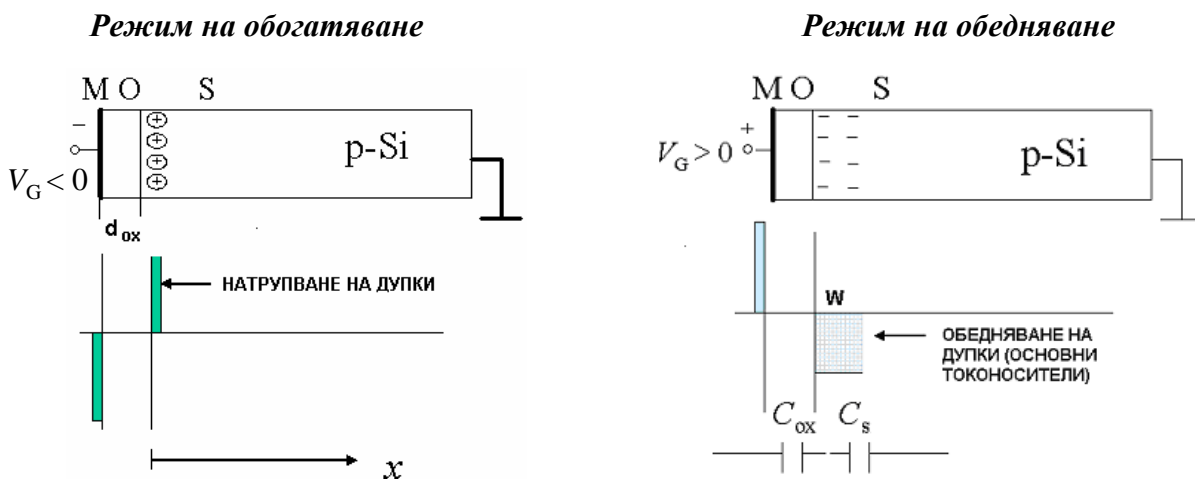


**Семинарно упражнение по Тънкослойна електроника на тема  
“Проектиране на интегрална MOS структура и снемане на волт-фарадна (C-V)  
характеристика”**

MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) структурата представлява плосък кондензатор, на който единият електрод е метал (гейт), а другият е полупроводникът. Системата метал-оксид-полупроводник включва подложка от високоомнен n- или p- тип силиций, върху която е формиран тънък диелектричен слой (най-често SiO<sub>2</sub>), а отгоре е разположен метален електрод. MOS структурата се моделира чрез последователно свързани два кондензатора: първият с постоянен капацитет C<sub>ox</sub>, зависещ само от параметрите на диелектричния слой (не от напрежението); вторият с променлив капацитет C<sub>s</sub>, който зависи от приложеното напрежение и се образува в резултат на обеднен слой.

Нека е дадена например MOS структура с полупроводник p-Si. При прилагане на отрицателно напрежение на металния електрод V<sub>G</sub><0, дупки от обема на полупроводника се привличат към отрицателния метален гейт и се натрупват на границата с оксида, тоест за приповърхностната област на полупроводника се казва, че се обогатява с основни токоносители. Формира се кондензатор, на който единият електрод е обогатената с дупки област, а другият е металния гейт. В този случай капацитетът на структурата се определя от капацитета на оксида C<sub>ox</sub>.



Капацитетът на структурата се определя от капацитета на оксида C<sub>ox</sub>.

Капацитетът на структурата се определя от последователно свързаните капацитети на оксида C<sub>ox</sub> и на обеднената зона C<sub>s</sub>.

$$C = C_{ox} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{r_{ox}} S}{d_{ox}}$$

S – площ на електрода, d<sub>ox</sub> – дебелина на оксида, ε<sub>r ox</sub> - диелектрична проницаемост на оксида, ε<sub>o</sub> – диелектрична константа на вакуума.

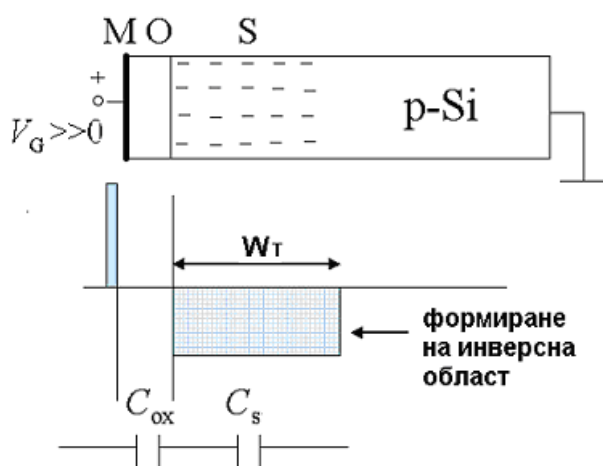
$$C = \frac{C_{ox} \cdot C_s}{C_{ox} + C_s}, \quad C_s = \frac{\epsilon_o \epsilon_{r_s} S}{W}, \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{r_{ox}} S}{d_{ox}}$$

φ<sub>s</sub> - повърхностен потенциал, q – заряд на електрона, N<sub>A</sub> – концентрация на основни токоносители,  $W = \sqrt{\frac{2\epsilon_o \epsilon_{r_s} \phi_s}{q N_A}}$  ширина на

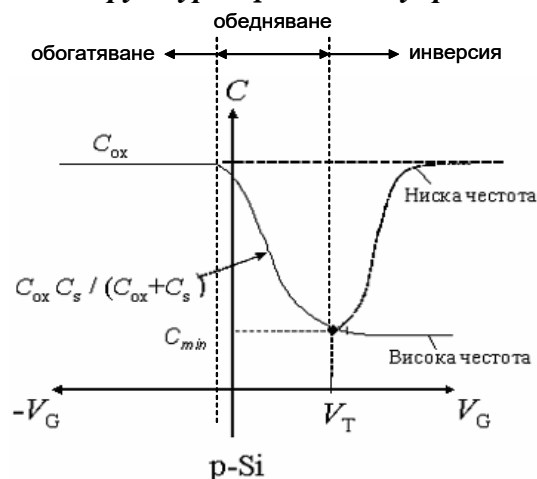
обеднената зона, ε<sub>rs</sub> – диелектрична проницаемост на обеднената зона в полупроводника.

При подаване на напрежение с положителна стойност на металния гейт  $V_G > 0$ , дупките се отблъскват от приповърхностната област (границата с оксида) към обема на полупроводника, а на тяхно място към повърхността се привличат електрони, които са неосновни токоносители за разглеждания случай на p-Si. Формира се обеднена (на основни токоносители) зона с широчина  $W$ , което води до намесата на втория капацитет  $C_s$ , който се явява последователно свързан на  $C_{ox}$ . Общият капацитет започва да намалява докато достигне определена минимална стойност. Напрежението, съответстващо на тази стойност се нарича прагово напрежение  $V_T$ . От този момент нататък ходът на волт-фарадната характеристика зависи от честотата на подаваното напрежение. При нискочестотно напрежение с увеличаването му общият капацитет започва да нараства. Концентрацията на неосновни токоносители в приповърхностната област се изравнява и дори надвишава тази на основните токоносители, при което се сменя знакът на проводимостта. Казва се, че се формира инверсна област (област с обратна проводимост на типа на полупроводниковата подложка). Ако напрежението на гейта е високочестотно, капацитетът не се променя след достигане на минималната му стойност, тъй като зарядите не могат да следват изменението на сигнала.

### Формиране на инверсна област



### Волт-фарадна характеристика на MOS структура с p-тип полупроводник



Капацитетът има минимална стойност, а напрежението на формиране на инверсен канал се нарича прагово напрежение.

$$C = C_{\min} = \frac{C_{ox} \cdot C_s}{C_{ox} + C_s}, C_s = \frac{\epsilon_o \epsilon_{rs} S}{W_T},$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{rox} S}{d_{ox}}, W = W_T = \sqrt{\frac{2 \epsilon_o \epsilon_{rs} 2 \phi_F}{q N_A}} \text{ прагово-}$$

ва стойност на ширината на обеднената зона при инверсия.

При инверсия на проводимостта в сила са:

$$\phi_s = 2 \phi_F, \quad \phi_F = \phi_T \ln \frac{N_A}{n_i},$$

където  $\phi_F$  - ниво на Ферми;  $\phi_T$  - температурен потенциал,  $n_i$  - собствена концентрация на токоносители.

Разгледаният ефект на управление на повърхностната проводимост с помощта на гейта в MOS структурата лежи в основата на действие на MOS транзистора с индуциран канал. Тогава прагавото напрежение е напрежението на формиране на

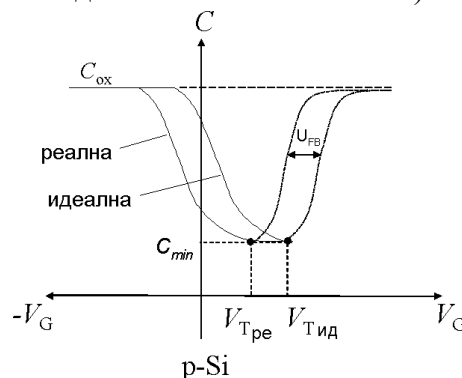
канала или още напрежение на отпушване на транзистора. За изясняване на процесите, протичащи в MOS структурата и за определяне на факторите, които оказват влияние върху стойността на праговото напрежение се разглеждат два случая – на идеална и на реална MOS структура и се прави съпоставка между волт-фарадните характеристики.

### Идеална MOS структура

В този случай се предполага, че няма разлика в отделителните работи на електрона от метала и полупроводника и няма заряд на интерфейса Si/SiO<sub>2</sub>, тоест първоначално има условие на плоски енергетични зони в полупроводника.

### Реална MOS структура

Процесът термичното окисление, използван за получаване на оксидния слой води до формиране на различни по природа заряди и уловки на токоносителите на разделителната граница Si/SiO<sub>2</sub>. Там има голямо количество разкъсани връзки, стремящи се да захванат заряд от обема на полупроводника, а и влизащи във взаимодействие със съседната среда (диелектрика). Освен това на повърхността има примесни атоми и йони (йонизирани акцепторни и донорни примеси). Така на прехода с металния слой още в начално състояние има някакъв заряд, който е положителен, независимо от типа на проводимост на полупроводника и индуцира равен по големина и противоположен по знак заряд в обема му. Това води до изгъване на енергетичните зони на силиция в тази област спрямо положението им в обема, в резултат на което волт-фарадната характеристика е изместена по оста на напрежението на разстояние  $U_{FB}$  – напрежение на плоски зони. Такова изместване на характеристиката се получава и от наличието на контактна потенциална разлика между метала и полупроводника. Така режим на обедняване или обогатяване може да се получи без да има напрежение на гейта. За да се избегне този нежелан ефект на гейта се прилага допълнително преднапрежение равно на напрежението на плоските зони  $U_{FB}$ . Смисълът на това напрежение е, че прилагането му компенсира първоначалното изгъване на зоните, тоест води до генериране на заряд, неутрализиращ първоначалния паразитен заряд. Само, че така се променя праговото напрежение на реалната структура спрямо това на идеалната, като към него се прибавя  $U_{FB}$  (определя се от отместването на волт-фарадната характеристика). В случая на p-Si тези заряди намаляват праговото напрежение и реалната характеристика се отмества наляво от идеалната, но при n-Si се получава увеличаване на праговото напрежение (характеристиката отново се измества наляво, но двете напрежения с еднакъв знак се наслагват).



**Волт-фарадни характеристики на идеална и реална MOS структура с p-тип полупроводник.**

**Стойности на някои константи:**

Диелектрична проникваемост на  $\text{SiO}_2$  -  $\epsilon_{rox} = 3,9$

Диелектрична проникваемост на обеднената зона в Si -  $\epsilon_{rs} = 11,7$

Диелектрична константа на вакуума -  $\epsilon_o = 8,9 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm} = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

Елементарен заряд на електрона  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Контактна потенциална разлика (за алуминиев контакт) -  $\phi_s = 0,357 \text{ V}$

Температурен потенциал -  $\phi_T = 0,026 \text{ V}$

**Основни положения:**

1. Праговото напрежение на MOS структурата зависи от нивото на легиране на повърхностния слой на полупроводника и от дебелината на оксида – по-високата степен на легиране води до по-високо прагово напрежение.
2. Максималният капацитет е равен на капацитета на оксида, а минималният се определя от последователно свързани капацитет на оксида и на обеднената зона.
3. По-ниската степен на легиране води до по-ниска стойност на  $C_s$  и следователно по-ниска стойност на  $C_{min}$ .
4.  $V_T$  - праговото напрежение е със знак: (+) за p-Si; (-) за n-Si.
5. 
$$V_T = 2\phi_F + \left[ \pm d_{ox} \frac{\epsilon_{rs}}{\epsilon_{rox}} \sqrt{\left( \frac{2qN_A}{\epsilon_o} \right)} |2\phi_F| \right]$$

(+) за p-Si    (+) за p-Si  
 (-) за n-Si    (-) за n-Si
6. В случая на p-Si, Q намаляват праговото напрежение и реалната характеристика се отмества наляво от идеалната; при n-Si се получава увеличаване на праговото напрежение (реалната характеристика отново се измества наляво, но двете напрежения с еднакъв знак се наслагат). Винаги реалната характеристика е отляво на идеалната.