

Присутність пентоксиду ніобію під час високотемпературного відпалу не впливає на забарвлення кристалів або ж, навпаки, зменшує забарвлення кристалів при відновлювальному відпалі.

*Робота виконана в рамках проектів "Катіон" та М/216-2003 Міністерства освіти і науки України.*

1. Кузьминов Ю.С. *Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития.* – М., 1987.
2. Кондратьев С.Н., Петржик Е.А. *Материалы для устройств на поверхностных и приповерхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника.* – 1986. №1. – С. 31–40.
3. Volk T.R., Rubinina N.M. // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 1988. – Vol. 108, No. 2. – P. 437–442.
4. Schirmer O.F., Thiemann O., Wohlecke M. // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1991. – Vol. 52, No. 1. – P. 185–200.
5. Ubizskii S.B., Matkovskii A.O., Mironova-Ulmane N., Skvortsova V., Suchocki A., Zhydachevskii Y.A., Potera P. // *Phys. Stat. Sol. (a)* – 2000. – Vol. 177. – P. 349–366.
6. Arizmendi L., Cabrera J.M., Agullo-Lopez F. // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1984. – Vol. 17. – P. 515–529.
7. Матковский А.О., Копко Б.Н., Прыриз Я.В., Цаль Н.А. // *Укр. физ. журн.* – 1989. – Т. 34, № 1. – С. 25–30.
8. Ахмадуллин И.Ш., Голенищев-Кутузов В.А., Мигачев С.А., Миронов С.П., // *Физика твердого тела.* – 1995. – Т. 37, № 2, – С. 415–421.

**Г.В. Кеньо, С.Ф. Кошель**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра напівпровідникової електроніки

## **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУР “КРЕМНІЙ–НА–ІЗОЛЯТОРІ” ЗА ДАНИМИ ВОЛЬТ-ФАРАДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

© Кеньо Г.В., Кошель С.Ф., 2004

**Подано теоретичні високочастотні вольт-фарадні характеристики МДНДН-структури. Показано характер впливу параметрів структури (рівнів легування підкладки та напівпровідникового шару і товщин діелектричних шарів) на залежність ємності від напруги. Виконана оцінка впливу вбудованих зарядів у діелектриках на величини зміщення ВФХ по осі напруг. Показана можливість отримання інформації про параметри шарів і стан меж розділу напівпровідник-діелектрик в структурі “кремній-на-ізоляторі” за даними реальних ВФХ.**

**In this work the theoretical high-frequency C – V characteristics of MISIS structure is presented. The character of influence of the structure parameters (dopant level of substrate and semiconductor layer, dielectric layers thicknesses) on the volt-capacitance dependence is shown. The influence of dielectric fixed charges on the shift value of C–V characteristic along voltage axes estimated. The possibility of obtaining the information about the layers parameters and semiconductor – insulator interface state in the “silicon-on-insulator” structure according to experimental C–V characteristics is shown.**

### **Вступ**

Важливим завданням, що виникає під час проектування і розроблення тривимірних інтегральних схем на основі КНІ структур, є розробка доступних методів контролю їх реальних параметрів на основі теоретичного аналізу польових ефектів в структурах метал – діелектрик – напівпровідник – діелектрик – напівпровідник і, як наслідок, науково обґрунтований пошук оптимальних параметрів структури активних компонентів.

Оскільки створення тривимірних інтегральних схем передбачає використання низькотемпературних процесів, тому базовою технологією формування напівпровідникових шарів приладної якості є променева КНІ-технологія [1]. Нарівні з високими вимогами до структурної досконалості модифікованого полікремнію важливим є також завдання збереження властивостей шарів, що лежать нижче, при формуванні багатошарової структури. У МДН-приладах, створених на основі КНІ-структур, затворний оксид одержують при окисленні полікристалічного кремнію. Отримана у такий спосіб межа розділу і власне оксид можуть мати значно гірші властивості, ніж аналогічні в приладах на основі монокристалічного кремнію, оскільки, крім власних дефектів полікремнію при формуванні затвора можуть виникнути нові. У плівкових приладах може збільшитись кількість поверхневих станів порівняно з об'ємними структурами. Тому точний контроль параметрів матеріалів КНІ-структури і стан меж розділу оксид-напівпровідник є критичним для прогнозування робочих характеристик активних приладів [2, 3].

### Модель КНІ МОН конденсатора

Структурно КНІ МОН конденсатор являє собою кремнієву підкладку з товстим ( $\sim 1$  мкм) шаром ізолюючого оксиду і осадженим шаром кремнію товщиною 0,5 мкм, на якому за стандартною технологією сформований підзатворний оксид і металевий затвор.

Зарядовий стан МДНДН-структури у разі прикладання напруги визначається системою рівнянь [4]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s0} \cdot E_{s2}(\varphi_{s2}) &= -\varepsilon_{s0} \cdot E_{s3}(\varphi_{s3}), \\ \varepsilon_{s0} \cdot E_{s1}(\varphi_{s1}) + \varepsilon_{s0} \cdot E_{s2}(\varphi_{s2}) &= -Q_{s0}, \\ U_1 - \phi_{ms} &= \varphi_{s1} + \frac{\varepsilon_{s0} \cdot E_{s1}(\varphi_{s1})}{C_{d1}}, \\ U_2 - \phi_k &= \varphi_{s3} + \varphi_{s2} + \frac{\varepsilon_{s0} \cdot E_{s3}(\varphi_{s3}) - \varepsilon_{s0} \cdot E_{s2}(\varphi_{s2})}{C_{d2}}, \\ U &= U_1 + U_2 \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{s0}$  – діелектрична стала кремнію;  $\phi_{ms}$  – контактна різниця потенціалів між металом і напівпровідником;  $\phi_k$  – контактна різниця потенціалів між двома напівпровідниковими шарами;  $\varphi_{s1}$ ,  $\varphi_{s2}$ ,  $\varphi_{s3}$  – поверхневі потенціали на трьох межах розділу напівпровідникових шарів з діелектричними;  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$ ,  $E_{s3}$  – відповідні напруженості поверхневих електричних полів, створених приповерхневими зарядами;  $Q_{s0}$  – внутрішній заряд в напівпровідниковому шарі;  $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$  – ємності оксидів підзатворного та ізолюючого оксидів кремнію відповідно.

Згідно з розв'язанням рівняння Пуасона напруженість поверхневого електричного поля в напівпровіднику однозначно визначається поверхневим потенціалом, що дає змогу розрахувати зміни потенціалів на трьох межах розділу при зміні прикладеної до структури напруги [4].

Ємність КНІ МОН конденсатора є результатом послідовного з'єднання ємностей діелектричних шарів  $C_{ox1}$  і  $C_{ox2}$  з ємностями областей просторового заряду в напівпровідниках  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ ,  $C_{s3}$  поблизу трьох меж розділу, причому враховується, що у ємність областей просторового заряду в режимі інверсії входить додатково ємність області максимального збіднення  $C_{max1}$ ,  $C_{max2}$ ,  $C_{max3}$ , увімкнених послідовно. Кожна з ємностей  $C_{max1}$ ,  $C_{max2}$ ,  $C_{max3}$  враховується лише якщо відповідний поверхневий потенціал набуде значення, що перевищує  $2 \cdot \phi_p$  (поверхневий заряд перебуває в режимі інверсії) [5].

### Вплив параметрів шарів КНІ МОН-конденсатора на хід ВФХ

На основі математичної моделі розраховані вольт-фарадні характеристики ідеального КНІ МОН-конденсатора (відсутні вбудовані заряди в діелектриках і заряди на поверхневих станах в напівпровідникових шарах поблизу меж розділу з діелектричними).

На рис. 1, 2 подано сім'ї теоретичних високочастотних ВФХ, де змінними параметрами є концентрація легування шару кремнію і концентрація домішок у кремнієвій підкладці відповідно.

На рис. 3, 4 подано сім'ї теоретичних високочастотних ВФХ, де змінними параметрами є товщини ізолювального та підзатворного діелектричних шарів.

Для виявлення впливу параметрів КНІ МОН-конденсатора на хід високочастотної ВФХ при зміні напруги, прикладеної до структури, необхідно скористатись аналізом зарядового стану в напівпровідниках поблизу меж розділу з діелектричними шарами [4], а також аналізом внеску ємностей областей просторового заряду і діелектричних шарів структури [5].

З поданих рисунків видно, що рівень легування осадженого шару кремнію і товщина ізолювального діелектрика впливають на ємність структури у всьому діапазоні напруг, рівень легування кремнієвої підкладки спричиняє вплив на хід ВФХ в області додатних напруг, товщина підзатворного діелектрика – в області від'ємних напруг.

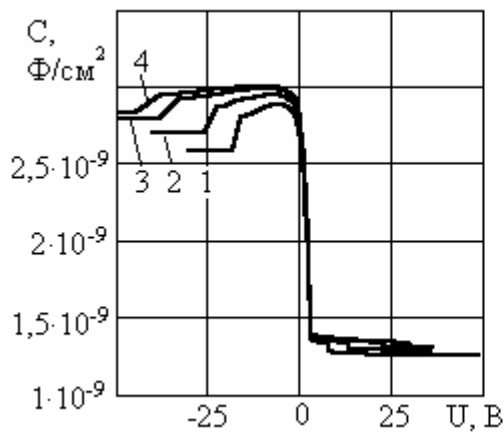


Рис. 1. Сім'я розрахункових високочастотних ВФХ з різною концентрацією легувальної домішки в напівпровідниковому шарі  $N_{a1}$ : 1 –  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 2 –  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 3 –  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 4 –  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

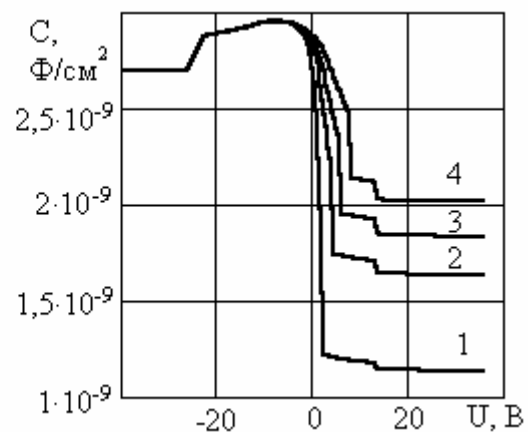


Рис. 2. Сім'я розрахункових високочастотних ВФХ з різними концентраціями легувальної домішки в напівпровідниковій підкладці  $N_{a2}$ : 1 –  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 2 –  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , 3 –  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , 4 –  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

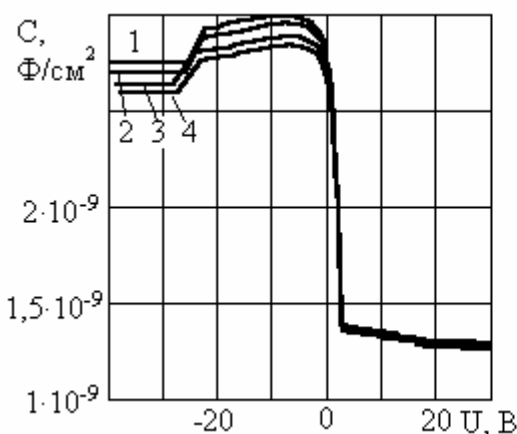


Рис. 3. Сім'я розрахункових високочастотних ВФХ з різними товщинами підзатворного діелектричного шару  $d_1$ : 1 – 50 нм, 2 – 70 нм, 3 – 100 нм, 4 – 120 нм

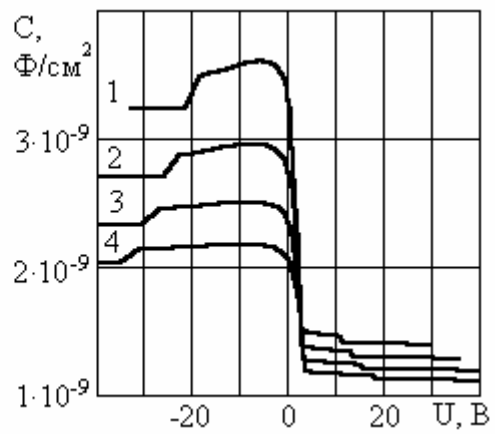


Рис. 4. Сім'я розрахункових високочастотних ВФХ з різними товщинами ізолювального діелектричного шару  $d_2$ : 1 – 0,8 мкм, 2 – 1 мкм, 3 – 1,2 мкм, 4 – 1,4 мкм

Аналіз зарядового стану показує, що в області великих від'ємних напруг поверхневі заряди в напівпровідниковому шарі поблизу підзатворного діелектрика і в кремнієвій підкладці поблизу ізолювального оксиду перебувають в режимі акумуляції і їх ємність не вносить істотного впливу в результуючу ємність структури і ємність КНІ МОН конденсатора визначається сумою ємностей підзатворного діелектрика, ізолювального оксиду і ємністю максимальної області збіднення в напівпровідниковому шарі поблизу ізолювального оксиду:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox1}} + \frac{1}{C_{ox2}} + \frac{1}{C_{max2}}. \quad (2)$$

В області великих додатних напруг вклад у ємність структури вносять увімкнені послідовно ємність ізолювального оксиду і ємності областей просторового заряду в напівпровідниковому шарі біля підзатворного діелектрика і в підкладці поблизу ізолювального оксиду, які перебувають в режимі інверсії, а поверхневий заряд в напівпровідниковому шарі поблизу ізолювального оксиду перебуває в режимі акумуляції і його ємність не впливає на результівну ємність структури:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox2}} + \frac{1}{C_{max1}} + \frac{1}{C_{max3}}. \quad (3)$$

Рівень легування напівпровідникової підкладки і товщина ізолювального оксиду є величинами відомими в результаті контролю цих величин у ході виробництва КНІ-підкладок, і не змінюються під час променевої модифікації осадженого шару кремнію. Величина ємності максимальної області збіднення однозначно визначається електрохімічним потенціалом в напівпровіднику  $\phi_p$  [5]:

$$C_{max} = \frac{\varepsilon_{s0}}{\sqrt{2} \cdot L_d} \cdot \frac{1 - \exp(-2 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \phi_p) + \frac{n_p}{p_p} \cdot \left[ \exp(2 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \phi_p) - 1 \right]}{\left[ \exp(-2 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \phi_p) + 2 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \phi_p - 1 + \frac{n_p}{p_p} \cdot \left[ \exp(2 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \phi_p) - 2 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \phi_p - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

де  $L_d$  – дебаївська довжина,  $p_p$  і  $n_p$  – концентрації основних і неосновних носіїв заряду в напівпровіднику відповідно,  $q$  – заряд електрона,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура.

Величину електрохімічного потенціалу отримуємо числовим розв'язанням рівняння (4) і, відповідно, розраховуємо рівень легування напівпровідника. Отже, враховуючи, що  $C_{max1}$  і  $C_{max2}$  є однакові через однорідність легування напівпровідникового шару у процесі його осадження, і знаючи величини  $C_{ox2}$  і  $C_{max3}$ , маємо два рівняння (2) і (3) з двома невідомими  $C_{ox1}$  і  $C_{max1}$ , які ми можемо розрахувати з ємності КНІ МОН-конденсатора в області великих від'ємних і великих додатних напруг.

Отже, з вимірювань ВФХ МДНДН-структур можна отримати додаткову інформацію про складові структури, параметри яких не можуть бути визначені іншими доступними методами, зокрема це стосується рівня легування полікремнію та товщини термічного оксиду, вирощеного на полікремнії в структурах типу "кремній–на–ізоляторі".

### Вплив фіксованих зарядів у діелектриках на ВФХ МДНДН-структури

Припустимо, що увесь заряд в діелектричних шарах зосереджений поблизу меж розділу і еквівалентні значення їх поверхневої густини становлять  $Q_3$ ,  $Q_3$ ,  $Q_3$  відповідно. У такому разі система рівнянь (1) замінюється системою:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s0} \cdot E_{s2}(\varphi_{s2}) - Q_2 &= -\varepsilon_{s0} \cdot E_{s3}(\varphi_{s3}) + Q_3, \\ \varepsilon_{s0} \cdot E_{s1}(\varphi_{s1}) - Q_1 + \varepsilon_{s0} \cdot E_{s2}(\varphi_{s2}) - Q_2 &= -Q_{s0}, \\ U_1 - \phi_{ms} = \varphi_{s1} + \frac{\varepsilon_{s0} \cdot E_{s1}(\varphi_{s1}) - Q_1}{C_{d1}}, \\ U_2 - \phi_k = \varphi_{s3} + \varphi_{s2} + \frac{\varepsilon_{s0} \cdot E_{s3}(\varphi_{s3}) - Q_3 - \varepsilon_{s0} \cdot E_{s2}(\varphi_{s2}) + Q_2}{C_{d2}}, \\ U &= U_1 + U_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Наявність зарядів в діелектричних шарах поблизу трьох меж розділу змінює зарядові стани в приповерхневих областях напівпровідників, причому кожен з фіксованих зарядів впливає на зарядовий стан тільки прилеглої до нього області напівпровідника, оскільки товщина кремнієвого шару є достатньо великою і області просторового заряду не взаємодіють між собою.

Визначення параметрів складових КНІ МОН-конденсатора за даними експериментальної ВФХ має важливе значення для побудови теоретичної ВФХ ідеального конденсатора з конкретними параметрами, оскільки значення вбудованих зарядів ми можемо отримати лише з величини зсуву певних ділянок експериментальної ВФХ відносно теоретичної кривої. Причому відомо, що крім методу ВФХ величину вбудованого заряду можна визначити лише за даними вольт-амперних характеристик МОН-транзисторів, що вимагає для здійснення контролю формування активних компонентів інтегральних схем.

Розглянемо, як впливають вбудовані в діелектрик заряди поблизу кожної з трьох меж розділу на вигляд ВФХ. Нехай в підзатворному діелектрику поблизу межі розділу з напівпровідниковим шаром міститься фіксований заряд  $Q_1$ , а заряди  $Q_2$  і  $Q_3$  дорівнює нулеві. Аналіз зарядового стану КНІ МОН-конденсатора показує, що позитивний заряд  $Q_1$  призводить до зсуву поверхневого потенціалу  $\phi_{s1}$  вліво по осі напруг, а залежності потенціалів  $\phi_{s2}$  і  $\phi_{s3}$  від напруги залишаються незмінними. Відповідно зміщується і ємність  $C_{s1}$  [5] ліворуч по осі напруг, а залежності ємностей  $C_{s2}$  і  $C_{s3}$  від напруги залишаються незмінними. Аналогічно впливають на зміну відповідних поверхневих потенціалів і вбудовані заряди в ізолювальному оксиді поблизу двох меж розділу з напівпровідниками.

На рис.5 показано вплив заряду  $Q_1$  на хід ВФХ КНІ МОН-конденсатора.

Позитивний заряд в підзатворному діелектрику на межі розділу з напівпровідниковим шаром приводить до зсуву ділянок ВФХ як в області від'ємних, так і в області додатних напруг. Однак закономірність зсуву особливо проявляється при невеликих додатних напругах, де ВФХ зміщується ліворуч по осі напруг. Вплив негативного заряду, однакового за абсолютним значенням, приводить до аналогічного зсуву цієї ділянки ВФХ праворуч по осі напруг. Розрахунки показують, що

$$\text{зміщення цієї ділянки ВФХ } \Delta U_1 = Q_1 \cdot \left( \frac{1}{C_{ox1}} + \frac{1}{C_{ox2}} \right).$$

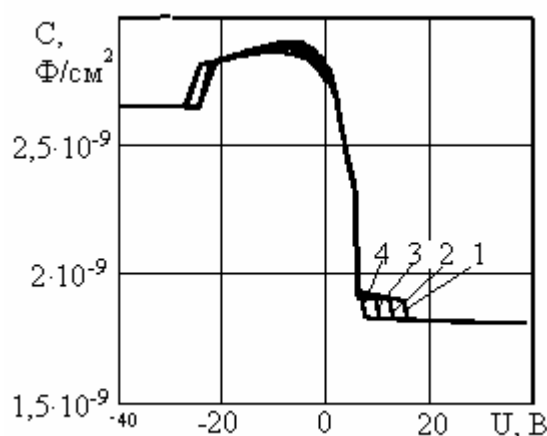


Рис. 5. ВФХ КНІ МОН-конденсатора за відсутності заряду в підзатворному діелектрику на межі розділу з напівпровідниковим шаром (1) і за наявності позитивного заряду  $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (2),  $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (3),  $1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (4)

На рис.6 подані ВФХ КНІ МОН-конденсатора за наявності вбудованого заряду в ізолювальному оксиді поблизу межі розділу з напівпровідниковим шаром, на рис.7 – поблизу межі розділу з напівпровідниковою підкладкою.

З рис.6 видно, що залежність ємності структури від напруги при наявності позитивного заряду  $Q_2$  буде зсуватись праворуч по осі напруг при від'ємних напругах. Проте величина зсуву у складний спосіб залежить від вбудованого заряду і від внутрішнього заряду в напівпровідниковому шарі. На зсув ВФХ впливає також наявність заряду в підзатворному діелектрику. Тому за величиною зсуву не можна розрахувати величини цих вбудованих зарядів. Однак визначення вбудованого заряду в ізолювальному оксиді на межі розділу з напівпровідниковим шаром не є

критичним, оскільки цей заряд впливає лише на порогову напругу паразитного МОН-транзистора, який утворюється в напівпровідниковому шарі з ізолювальним оксидом як підзатворним діелектриком і кремнієвою підкладкою як затвором. Інверсний стан в напівпровідниковому шарі поблизу цієї межі розділу виникає при напругах близько  $-20$  В (при концентраціях легування  $10^{14}-10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ ), за наявності вбудованого заряду  $Q_2=10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  ВФХ зміщується праворуч на  $\sim 5$  В, що не може спричинити виникнення паразитного транзистора при використанні схем з тривимірною інтеграцією елементів.

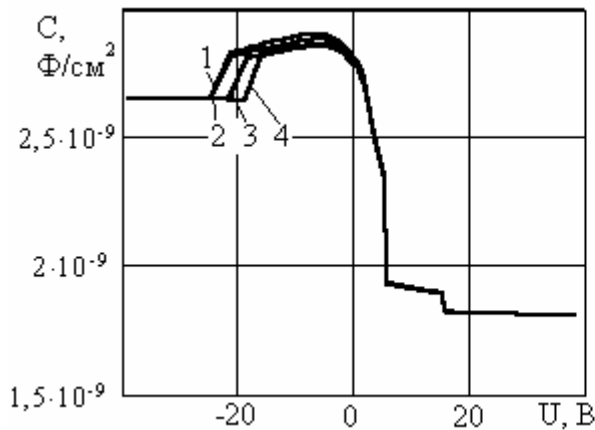


Рис. 6. ВФХ КНІ МОН-конденсатора за відсутності заряду в ізолювальному оксиді на межі розділу з напівпровідниковим шаром (1) і за наявності позитивного заряду  $5 \cdot 10^{10}$   $\text{см}^{-2}$  (2),  $1 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  (3),  $1,5 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  (4)

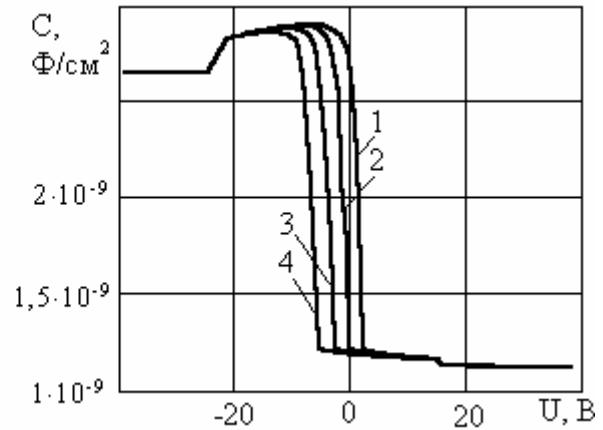


Рис. 7. ВФХ КНІ МОН-конденсатора за відсутності заряду в ізолювальному оксиді на межі розділу з напівпровідниковою підкладкою шаром (1) і за наявності позитивного заряду  $5 \cdot 10^{10}$   $\text{см}^{-2}$  (2),  $1 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  (3),  $1,5 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  (4)

З рис 7. видно, що позитивний заряд  $Q_3$  призводить до зсуву ділянки ВФХ в області невеликих додатних і від'ємних напруг ліворуч по осі напруг. Розрахунки величини зсуву дають

нам величину  $-\Delta U_3 = Q_3 \cdot \left( \frac{1}{C_{ox1}} + \frac{1}{2 \cdot C_{ox2}} \right)$ . Отже, можна визначити, наскільки променева

модифікація полікремнієвого шару впливає на якість межі розділу ізолювальний оксид – напівпровідникова підкладка, і як впливає на характеристики приладів, які можуть бути у ній вже сформованими.

### Висновки

Отже, розрахунок теоретичної ВФХ ідеального КНІ МОН конденсатора дає змогу отримати додаткову інформацію як про параметри складових структури, так і визначити величини зсуву певних ділянок характеристики, з яких можна отримати величину та знак фіксованих зарядів в діелектриках поблизу меж розділу.

1. Гиваргизов Е.И. Искусственная эпитаксия – перспективная технология элементной базы микроэлектроники. – М., 1988.
2. Tack M., Claeys C., Declerck G. // *Solid-State Electronics*, 1990. 33. P.357–364.
3. Mc Daid L.J., Hall S., Eccleston W. // *Solid-State Electronics*, 1988. 32. P.65–68.
4. Кеньо Г.В., Малик О.П. // *Вісник ДУ “Львівська політехніка”*, 1998. 327. С. 245–249.
5. G. Kenyo, O. Malyk // *2-th International Symp. “Microelectronics Technologies and Microsystems” Lviv*. 1998. P. 257–260.