

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА СЕНСОРІВ

SENSORS PRODUCTION TECHNOLOGIES

УДК 53.043

ФОРМУВАННЯ КРЕМНІЄВИХ МІКРО- ТА НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ

О. В. Стеблова¹, О. Л. Братусь², Ю. М. Педченко², А. А. Євтух^{1,2}

¹КНУ імені Тараса Шевченка Інститут Високих технологій Глушкова 2,
Київ, Україна,
e-mail: vitasteblova@rambler.ru

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова, 41 проспект Науки,
м. Київ, 03028, Україна

ФОРМУВАННЯ КРЕМНІЄВИХ МІКРО- ТА НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ

О. В. Стеблова, О. Л. Братусь, Ю. М. Педченко, А. А. Євтух

Анотація. В даній роботі були сформовані резонансно-тунельні структури на основі нанокомпозитних плівок $\text{SiO}_2(\text{Si})$, що містять Si нанокристали в діелектричній матриці методами хімічного осадження при низькому тиску (LP CVD — low pressure chemical vapor deposition) та методу іонно-плазмового розпилення (IPS). Кремнієві нанорозмірні структури формувались як на плоскій поверхні, так і на кремнієвих вістрях. Формування кремнієвих наноострівців зі збагачених кремнієм плівок SiO_x відбувалось в процесі відпалу при температурах 1000°C, 1050°C та 1100°C. Проведено аналіз структури поверхні вихідної та відпаленої плівок SiO_x , отриманих методом IPS, за допомогою атомно-силової мікроскопії (АСМ). Досліджувався вплив відпалу на розміри нанокристалів для зразків з різною концентрацією надлишкового кремнію у вихідній плівці. Виявлений ефект немонотонної електронно-польової емісії (ЕПЕ) з поверхні плівок $\text{SiO}_2(\text{Si})$ сформованої методом LP CVD.

Ключові слова: хімічне осадження при низькому тиску, іонно-плазмове розпилення, плівки SiO_x , нанокристали кремнію, резонансно- тунельні структури, польова емісія.

FORMATION OF SILICIM MICRO- AND NANOSTRUCTURES FOR ELECTRON FIELD EMISSION

O. V. Steblova, O. L. Bratus', Yu. M. Pedchenko, A. A. Evtukh

Abstract. In this work resonance-tunnel structure based on nano-composite films $\text{SiO}_2(\text{Si})$, which contain Si nanocrystals in a dielectric matrix have been formed by method of chemical deposition at low pressure (LP CVD — low pressure chemical vapor deposition) and ion plasma sputtering (IPS). Silicon nanosize structures were formed as on a flat surface and on the silicon tip. The formation of silicon nanoislands from silicon enriched SiO_x films were performed during annealing at temperatures of 1000°C, 1100°C and 1050°C. AFM topography image of the original SiO_x and annealing films,

deposited by ion-plasma sputtering have been obtained. The influence of annealing for samples with different concentration of silicon in the initial film have been investigated on nanoclustersize. The effect of nonmonotonic electron field emission (EFE) from the surface film SiO_2 (Si) formed by LP CVD method has been revealed.

Keywords: Low pressure chemical vapor deposition, ion-plasma sputtering, SiO_x films, silicon nanocrystals, resonant — tunneling structure, field emission.

Вступ

Перспективним для практичного застосування є створення та дослідження нанорозмірних структур на основі кремнію - основного матеріалу сучасної мікро- і наноелектроніки. Резонансно-тунельні структури можуть бути використані в пристроях як твердотільної, так і вакуумної електроніки. Вони є перспективними для використання в надвисокочастотній (НВЧ) техніці. Дані структури мають N -подібні вольт-амперні характеристики, що вказує на можливість генерації НВЧ електромагнітних коливань [1].

Резонансно-тунельні діоди (РТД) можуть бути виготовлені з використанням різних типів матеріалів (таких як напівпровідники A^3B^5 , A^2B^6 , четвертої групи) і різних типів резонансно-тунельних структур (таких як сильно-леговані p - n переходи в діодах Єсакі, двох бар'єрні структури, трьох бар'єрні структури, квантові ями, дроти чи квантові точки) [2]. Основною метою даної роботи було сформулювати резонансно-тунельні структури на основі наноконкомпозитних плівок SiO_2 (Si), що містять Si нанокристали в діелектричній матриці методами хімічного осадження при низькому тиску LP CVD та IPS та дослідити їх структурні властивості і польову емісію.

2. Експериментальна частина

В даній роботі кремнієві нанорозмірні структури формувались як на плоскій поверхні так і на кремнієвих вістрях. Очікується, що наявність нанокластерів на кремнієвих вістрях буде сприяти електронній польовій емісії та приведе до реалізації резонансного тунелювання [3].

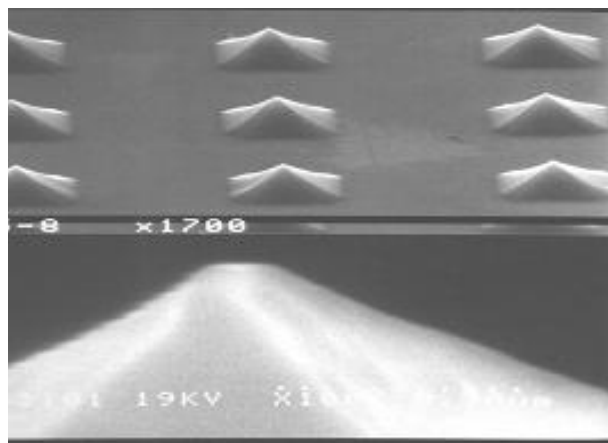
2.1. Формування кремнієвих вістрійних матриць

Кремнієві вістрійні матриці, які досліджувались в даній роботі, виготовляли в два етапи. Спочатку на кремнії n -типу з орієнта-

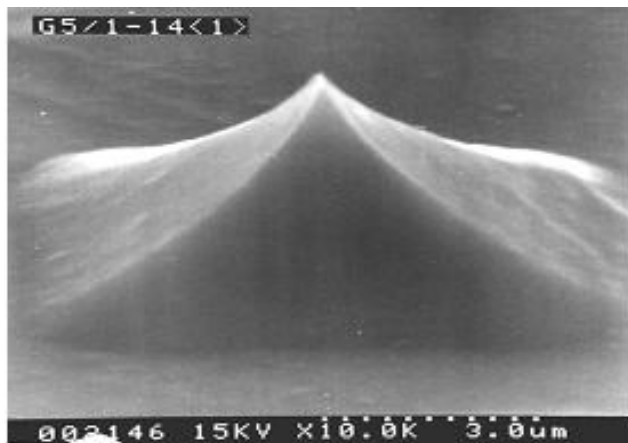
цією поверхні (100) і концентрацією легуючої домішки (фосфор) $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ формували вихідні вістрійні матриці [4]. На кремнії після хімічної обробки в розчині «Каро» ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 3:1$) та перекисно-аміачному розчині ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:3:1$) вирощувалась плівка SiO_2 товщиною від 10 до 40 нм термічним окисленням в сухому кисні. Потім за допомогою методу піролітичного осадження з парогазової фази при низькому тиску LP CVD на поверхню SiO_2 наносилась однорідна плівка нітриду кремнію Si_3N_4 товщиною 200 нм. Нітрид кремнію використовується, як маскуючий шар при травленні кремнію. Далі проводився процес фотолітографії та послідує плазмохімічне травлення шару Si_3N_4 та SiO_2 . Таким чином, за допомогою фотолітографії задавалися розміри основи піраміди $10 \times 10 \text{ мкм}$ або $5 \times 5 \text{ мкм}$, що визначалися маскою оксидного та нітридного шарів. Кремній травили в ізотропному травнику, який включав в себе 25 частин азотної кислоти (HNO_3), 10 частин плавикової кислоти (HF) і 3 частини оцтової кислоти (CH_3COOH). Час травлення становив 6,5 хвилин. В результаті цього формувались пірамідальні вістря з відносно великим радіусом кривизни вершини ($r \geq 100 \text{ нм}$). Густина вістер з основою $10 \times 10 \text{ мкм}$ становила $2,5 \times 10^5 \text{ вістер/см}^2$, а з основою $5 \times 5 \text{ мкм}$ – $1 \times 10^6 \text{ вістер/см}^2$.

На другому етапі проводилось окислення кремнію в сухому кисні при температурі 950°C протягом від 2 до 5,5 год. За цей час на поверхні кремнію виростає окисел товщиною 60 - 120 нм. Потім термічно вирошений окисел стравлювався у водному розчині плавикової кислоти ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:10$). Це дало змогу отримати кремнієві вістря з радіусом кривизни поверхні вершини 10-20 нм. При подальшій оптимізації технології виготовлення отримували вістря з $r = 7 \text{ нм}$.

Наведені СЕМ зображення рис.1 показують, що вістря на кремнії (100) мають форму пірамід з квадратною основою 8×8 мкм та відстанню між центрами квадратних основ 12 мкм. Висота кремнієвих вістрів була від 2 до 4 мкм. Верхівка є досить гострою, з радіусом кривизни при вершині 10-15 нм для орієнтації поверхні кремнію (100).



(a)



(б)

Рис.1. Мікрофотографії матриць Si вістрів (а), та окремого вістря (б) отримані за допомогою СЕМ (орієнтація поверхні кремнію (100)).

2.1. Технологія формування нанокмпозитних плівок $\text{SiO}_2(\text{Si})$ методом LP CVD на кремнієвих вістрійних атрицях.

Вище описаний процес формування кремнієвих вістрійних матриць. Потім за допомогою методу LP CVD на матрицю кремнієвих нановістрів наносилася плівка SiO_x . Підведення тепла для активації процесу осадження плівок

забезпечується зі стінок реакційної камери, яка знаходиться в пічці подібній до окислювально-дифузійної. Такий реактор вважається реактором з гарячими стінками [5]. Використовується повітряне охолодження (зазвичай для горизонтальних реакторів). Функціональна схема реактора для вирощування оксиду кремнію та кремнію наведена на рис. 2.

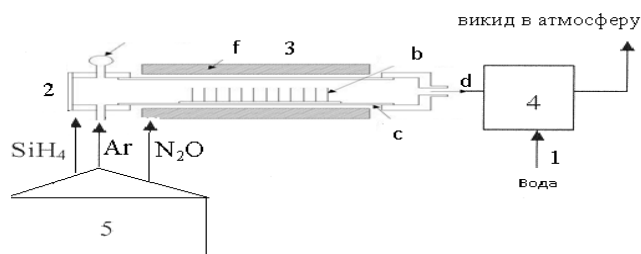


Рис.2. Функціональна схема установки LPCVD: 1 — вода охолодження, 2 — електроенергія, 3 — реактор (а — датчик тиску, b — пластини, c — кварцова труба, d — насос, f — зона печі), 4 — скруббер, 5 — газорозподільний пристрій.

В якості постачальника кисню використовували N_2O , а в якості постачальника кремнію - SiH_4 . Хімічна реакція, що призводить до осадження плівок на поверхні підкладки стимулювалася за рахунок високої температури 640°C і мала наступний вигляд: $\text{SiH}_4 + 4\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ [6]. Після осадження плівки проводився термічний відпал в Ag при температурі 1000°C протягом 1 год. Товщини осаджених плівок визначалися методом еліпсометрії, і відповідно, мали наступні значення: $d_1 = 2,6$ нм, $d_2 = 4,6$ нм та $d_3 = 6,6$ нм.

Також проводили осадження плівок полікремнію на матрицю кремнієвих нановістрів. Полікремній осаджували шляхом піролізу силану за наступною хімічною реакцією: $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$ протягом 3 хв. при температурі 640°C . Середня швидкість осадження знаходиться в проміжку 10 – 20 нм/хв. Найбільш суттєвими параметрами процесу осадження є температура, тиск та потік силану. Такі параметри, як відстань між підкладками і кількість підкладок впливають на процес осадження значно менше [7].

Ріст плівок проводиться на установці Elmatec Electronics (Англія). Задання температури, температурного градієнту та підтримання температури на заданому рівні здійснюється

за допомогою 3-х блоків Eurotherm. Центральний відповідає за встановлення температури в робочій точці, а крайні за формування того, чи іншого температурного профілю вздовж реактора. Максимально досяжний вакуум контролюється за допомогою вакууметра ВІТ –2. Робочий тиск контролюється вакууметром ІЗВТЗ – 003. Газові потоки контролюються за допомогою ротаметрів, а при дуже малих рівнях (нижче чутливості ротаметрів) по зміні робочого тиску, що викликається подачею певного газу. Наступний термічний відпал проводився в Аг при температурі 1000°C протягом 1 год. Термообробка зразка приводить до розпаду вихідного матеріалу (SiO_x) на дві фази– SiO_2 і Si , причому остання має вид кремнієвих нановключень [8]. Цей факт і знаходить відображення, зокрема, в характері рельєфу поверхні відпаленої плівки.

2.3. Формування нанокомпозитивних плівок $\text{SiO}_2(\text{Si})$ методом іонно-плазмового розпилення.

Плівки SiO_x отримувались також методом іонно-плазмового розпилення кремнієвої мішені у вакуумі на с-Si (n - тип) підкладку в атмосфері аргону та кисню. Основні параметри технологічного процесу: тиск процесу осадження становив $p = 8 \times 10^{-4}$ мм.рт.ст., підкладка нагрівалась до температури 150°C , швидкість осадження становила 20-25 нм/хв [9].

Для дослідження впливу температури на трансформацію плівки SiO_x в нанокомпозитну $\text{SiO}_2(\text{Si})$ плівку з кремнієвими нанокристаллами в діелектричній матриці SiO_2 , проводилися відпали при різних температурах ($T = 1000^{\circ}\text{C}$, 1050°C та 1100°C) протягом 30 хв в атмосфері азоту.

Після осадження плівок та температурних відпалів, за допомогою методу еліпсометрії ($\lambda = 632,8$ нм) визначались їх товщина та показники заломлення.

Морфометрію поверхні плівок до та після відпалу проводили на атомно-силовому мікроскопі (АСМ) серії NanoScope IIIa в режимі періодичного контакту кремнієвими зондами із номінальним радіусом заокруглення вістря до 10 нм.

2.4. Експериментальні дослідження польової емісії з наноструктур $\text{SiO}_2(\text{Si})$.

Для отримання вольт-амперних характеристик (ВАХ) електронної польової емісії зразків у залежності від умов їх виготовлення проводили виміри при кімнатній температурі у вакуумній системі, яка відкачувалась до стабільного тиску 10^{-7} мм.рт.ст.. Відкачка проводилася у два етапи. Спочатку використовувався вакуумний насос адсорбційного типу з охоложеною рідким азотом пасткою з активованого вугілля. Після підключення магніто-розрядного насоса, рівень вакууму доводився до необхідного значення порядку 10^{-7} мм.рт.ст.

Вимірювання вольт-амперних характеристик досліджуваних зразків проводилися у плоскій діодній конфігурації в робочій камері високовакуумної установки з безмасляною відкачкою рис.3. Тиск залишкових газів у камері під час проведення експериментів не перевищував $4 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст. Як анод використовували пластину з кварцу покриту електропровідною плівкою ІТО. Вимірювання ЕПЕ проводилися за допомогою автоматизованої системи вимірювання ВАХ Keithley-2410. В якості програмного забезпечення автоматичного вимірювання та збору отриманих даних використовувався програмний пакет Labtracer 2.0 компанії Keithley.

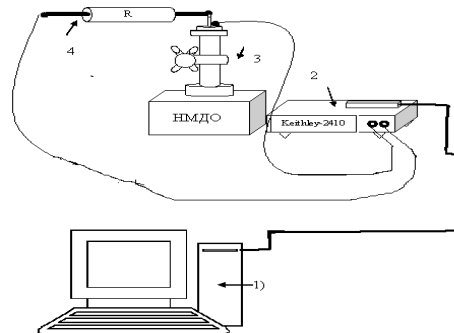


Рис.3. Схема установки автоматизованого вимірювання параметрів електронної польової емісії у вакуумі 1) персональний комп'ютер із системою узгодження КОП, RS-232; 2) автоматизована система вимірювання ВАХ Keithley-2410 ;3) вакуумна камера для зразків з системою відкачки НМДО-125; 4) обмежувальний опір.

3.Результати і обговорення.

Аналіз АСМ зображення топографії вихідної плівки SiO_x отриманої методом іонно-плазмового розпилення показав, що дана поверхня є досить однорідна ($\text{RMS} \approx 0,18$ нм), сформо-

вана дрібними зернами з видимим діаметром до 10 нм і висотою до 0,4 нм. Вплив відпалу досліджувався для зразків з різною концентрацією кремнію у вихідній плівці. Так відпал зразка з меншою концентрацією кремнію при температурі 1000 °С зумовив формування nanoострівців з видимими діаметрами основи в межах 15-20 нм і висотами 0,3-1,5 нм та поверхневою густиною порядку $4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, при більшій температурі (1100°С) - густина острівців незмінна, але збільшився діапазон їх розмірів: 15-30 нм та 0,5-2,0 нм, відповідно рис.4.а. Поведінка зразка з більшою концентрацією кремнію при рості температури відпалу інакша. При 1050°С на поверхні утворились два типа острівців: дрібні з видимими діаметрами основи в межах 15-20 нм і висотами 0,3-1 нм та густиною порядку $4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ та більші із розмірами 40-50 нм і 0,5-1,0 нм, відповідно та густиною $1,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Вища температура відпалу 1100°С приводить до утворення однорідних за розмірами, але більших острівців з видимим діаметром в межах 40-60 нм, висотою 1,0-2,0 нм та меншою густиною – $8 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ рис.4.б. Показано, що відпал зразка з меншою концентрацією надлишкового кремнію в плівці SiO_x при температурі 1100°С приводить до формування nanoострівців з видимими діаметрами основи в межах 15-30 нм і висотами 0,5-2 нм і поверхневою густиною та густиною порядку $4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В той же час на поверхні зразка з більшою концентрацією надлишкового кремнію утворились однорідні за розмірами більші острівці з видимим діаметром в межах 40-60 нм, висотою 1,0-2,0 нм та меншою густиною – $8 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$.

Дослідження АСМ показали, що температурний відпал привів до значної зміни рельєфу: на фоні вихідної поверхні утворились окремі nanoострівці кремнію. Порівнюючи вплив концентрації кремнію на формування рельє-

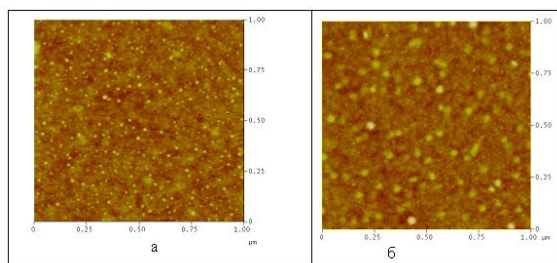


Рис.4. АСМ зображення топографії плівки $\text{SiO}_2(\text{Si})$ з меншою концентрацією надлишкового кремнію (а) та більшою концентрацією (б) (відпал при $T=1100^\circ\text{C}$).

фу внаслідок високотемпературного відпалу, можна зробити наступний висновок: чим вища концентрація кремнію у вихідних плівках, тим більші острівці формуються із відпалом, густина яких відповідно зменшується.

3.2. Особливості електронної польової емісії з резонансно-тунельних структур $\text{SiO}_2(\text{Si})$.

На рис.5 зображені результати вимірів ЕПЕ (I-V характеристики та залежності Фаулера-Нордгейма) з поверхні досліджених плівок SiO_x в вакуум. Видно, що у випадку вихідної плівки емісійний струм спостерігався при достатньо високих напругах, що подавалися на зразок (570-770 В), і становив величину (10^{-7} - 10^{-6}) А. Польова емісія зі зразків, які відпалювались не спостерігалась в усьому діапазоні напруг. Однак, для випадку плівки відпаленої і протравленої в розчині $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$, емісія суттєво підсилювалась в порівнянні з вихідними структурами. Вона починалась вже при напругах ≈ 375 В і максимальні струми досягають значень $\approx 10^{-5}$ А. На відпалених плівках і в подальшому протравлених в травнику для кремнію емісія була відсутня. Відмітимо, що для ВАХ, які ви-

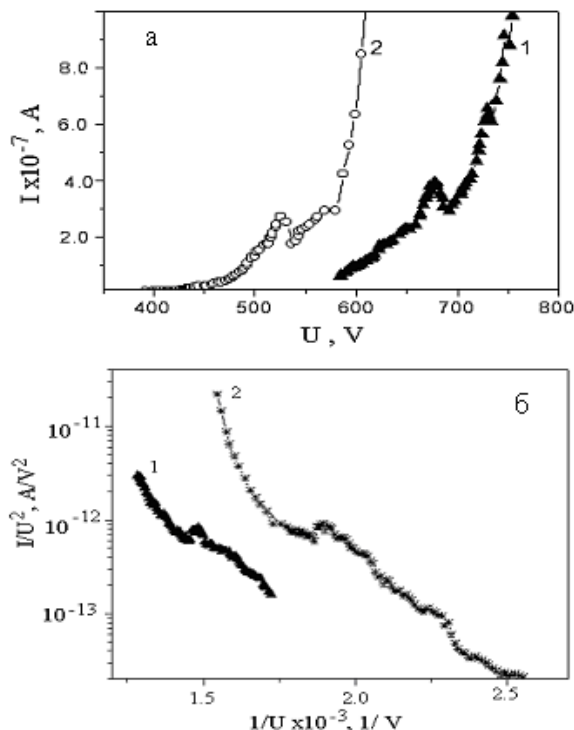


Рис.5 I-V характеристики емісійного струму з плівок SiO_x та $\text{SiO}_2(\text{Si})$ (а) та відповідні залежності в координатах Фаулера-Нордгейма (б): 1 — емісія з SiO_x , 2 — емісія з $\text{SiO}_2(\text{Si})$.

мірювались у випадку вихідних зразків (SiO_x) спостерігався різкий стрибок струму польової емісії в області порогової напруги.

З I-V характеристик емісійного струму було визначено ряд параметрів катодів, а саме коефіцієнт підсилення електричного поля (β^*) і ефективна площа емісії (α) [10]. Видно, що ефективна площа емісії у випадку плоских катодів SiO_x більша ніж для вістрійних кремнієвих катодів, причому термічний відпал плівок SiO_x приводить до подальшого росту (α). Коефіцієнт підсилення електричного поля для плоских катодів, природно, менший, ніж вістрійних.

Як правило при ЕПЕ залежність повного струму від напруги записується у вигляді:

$$I = a \cdot U^2 \cdot \exp(-b/U), \quad (1)$$

де a, b – коефіцієнти, які визначаються:

$$b = \frac{v(y) \cdot B \cdot \phi}{\beta}, \quad (2)$$

де α – ефективна площа емітуючої поверхні; β – коефіцієнт трансформації; b – нахил прямої в координатах $\ln I/V^2 - I/V$, I – повний струм, а U – напруга вершини вістря.

Табульована функція Нордгейма – $v(y)$:

$$v(y) = 0,95 - y^2 \quad (3)$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}\right) \cdot \left(\frac{q^3 \cdot F}{\pi^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot 4}\right)} \cdot \frac{1}{\phi} \quad (4)$$

де $\varepsilon = 12$ для Si [5]. Величина β постійна (залежить від геометричної форми вістря і відстані анод і емітер). Визначення параметрів електронної польової емісії, а саме: ефективної площі емісії, роботи виходу і коефіцієнта підсилення електричного поля пов'язано, з багатьма труднощами.

Із нахилу ВАХ в координатах ФН можна визначити коефіцієнт трансформації електричного поля:

$$\beta = \frac{v(y) \cdot B \cdot \phi^2}{b} \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення електричного поля визначаємо з виразу $\beta^* = \beta \times L$, де L – відстань катод – анод. Таким чином розраховані пара-

метри—ЕПЕ з кремнієвих вістрів $\alpha = 1.5 \times 10^{-14} \text{ см}^2$, $\beta = 1.6 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$, $\beta^* = 120$.

Немонотонності ВАХ емісійного струму, такі як осциляції і піки спостерігались також рядом інших авторів для різних типів структур і матеріалів [11]. Наявність ділянок з від'ємною диференційною провідністю (пиків) на ВАХ емісійного струму пояснюється квантово-розмірними ефектами в таких структурах і проявом при певних електричних полях додаткового механізму струмопереносу — резонансного тунелювання електронів.

Виявлений ефект немонотонної ЕПЕ з поверхні плівок SiO_x можна пояснити враховуючи фазовий склад вихідної і відпаленої плівки SiO_x , підсиленням електричного поля на поверхневих зернах кремнію і механізмами струмопереносу при ЕПЕ. Після термічного відпалу плівок SiO_x відбувається фазове розшарування з утворенням фаз SiO_2 і Si. Енергетична зонна діаграма відпаленої плівки рис.6 подібна діаграмі не відпаленої, однак в цьому випадку висоти енергетичних бар'єрів на границі Si-SiO₂ є більшими, розміри Si включень є меншими, а їх густина більшою [12]. Велика висота енергетичного бар'єру на границі Si-SiO₂ (3,2 eВ) і є причиною відсутності ЕПЕ в області досліджуваних електричних полів, оскільки зовнішній бар'єр SiO₂ + вакуум має малу ймовірність тунелювання для емісії електронів.

Очевидно, що, по крайній мірі, частина піків рельєфу поверхні плівки, які спостерігались обумовлена включеннями кремнію. Ці зерна кремнію внаслідок локального підсилення електричного поля і сприяють появі ЕПЕ, тоді як їх наявність в об'ємі окислу завдяки тому ж ефекту полегшує протікання електричного струму через плівку. Якщо припустити, що в вихідному окислі кремнію SiO_x включення кремнієвої фази покриті тонким шаром SiO, то в області сильних електричних полів проходження електронів з Si підкладки до зовнішньої поверхні окислу буде протікати через шарки SiO. На зовнішній поверхні при емісії в вакуум електрон переборює складний бар'єр Si – SiO + вакуум, який утворюється через на-

явність шару окисла, що покриває поверхневі кремнієві зерна. Пробій цього шару і обумовлює початковий різкий стрибок струму на початку емісії. Подальша емісія електронів протікає вже через бар'єр Si-вакуум. Пік на емісійних ВАХ, що спостерігаються при $V \approx 650\text{В}$. можна пояснити включенням механізму резонансного тунелювання електронів: внаслідок квантово-розмірного ефекту в зоні провідності поверхневого зерна Si з'являються локальні енергетичні рівні, які при певних електричних полях і забезпечують підсилену польову емісію через них. Під час травлення в розчині HF: H_2O зовнішній шар структур з плівками $\text{SiO}_2(\text{Si})$ видаляється з кремнієвих включень. В цьому випадку для емісії електронам необхідно подолати лише бар'єр обумовлений вакуумом рис.6.

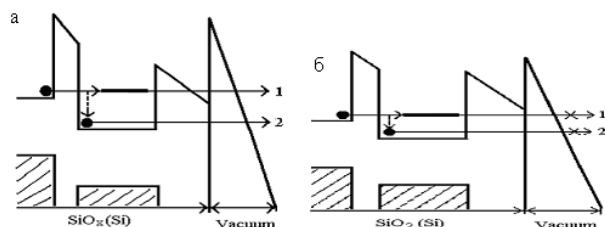


Рис.6. Схематичне зображення механізмів ЕПЕ з структур SiO_x та $\text{SiO}_2(\text{Si})$: а) вихідна плівка SiO_x , б) після відпалу $\text{SiO}_2(\text{Si})$, (1 — резонансне тунелювання; 2 — тунелювання Фаулера-Нордгейма,).

Крім того, внаслідок відпалу і обумовленим ним ущільнення плівки оксиду її товщина зменшується, що сприяє полегшенню переносу електронів. Оскільки середні розміри поверхневих кремнієвих включень в віддаленій плівці SiO_x складають величину порядку (1-3 нм) [13] (що співрозмірно з довжиною хвилі де Бройля електронів в кремнії), то в цьому випадку квантово-розмірні ефекти обумовлюють включення при певних напруженостях електричного поля резонансно-тунельного механізму струмопереносу, що і приводить до появи піків на ВАХ емісійного струму.

4. Висновки

Були сформовані резонансно-тунельні структури з використанням методів LP CVD та IPS. Дослідження АСМ вихідної і відпаленої нанокompatивної плівки $\text{SiO}_2(\text{Si})$ показали, що

чим вища концентрація кремнію у вихідних плівках, тим більші острівці формуються із відпалом, густина яких відповідно зменшується.

В результаті дослідження польової емісії з нанокompatивних плівок $\text{SiO}_2(\text{Si})$ виявлено, що у випадку вихідної плівки емісійний струм спостерігався при достатньо високих напругах, що подавались на зразок (570-770 В), і становив величину (10^{-7} - 10^{-6}) А. Але польова емісія зі зразків, які відпалювались не спостерігалась в усьому діапазоні напруг. Ефективна емісія з'являлась лише в протравлених зразках. На ВАХ емісійного струму спостерігались ділянки з від'ємною диференційною провідністю (піками). Виявлений ефект немонотонної ЕПЕ з поверхні плівок SiO_x можна пояснити з врахуванням фазового складу вихідної і відпаленої плівок SiO_x , підсиленням електричного поля на поверхневих зернах кремнію і механізмами струмопереносу при ЕПЕ.

Запропонована модель ЕПЕ, в якій допускається, що обмежуючим процесом струмопереносу в області високих полів є тунелювання Фаулера-Нордгейма через бар'єри Si-SiO_x + вакуум і Si-вакуум. Піки струму на емісійних I-V характеристиках пояснені в рамках механізму резонансного тунелювання.

Список використаної літератури

1. Donghwan K., Sang J Kwon, Jong D. L., Fabrication of silicon field emitters by forming porous silicon // J. Vac. Sci. Technol. B. — 1996. — V.14(3). — P. 1906–1909.
2. Алкеев Н. В., Аверин С. В., Дорофеев А. А., Резонансно-тунельный диод на основе гетеросистемы GaAs/AlAs для субгармонического сместителя // Приборы микро - и нанoeлектроники. — 2010. — Т.39, №5. — С.356-365.
3. Litovchenko V. G., Evtukh A. A., Litvin u. M., Goncharuk N. M., Chaika V. E., Observation of the resonance tunneling in field emission structures // J. Vac. Sci. Technol. B. — 1999. — V.17,P — 655–661.
4. Yi L. X., Heitmann J., Scholz R., and Zacharias M., Si rings, Si clusters, and Si nanocrystals — different states of ultrathin SiO_x layers // J. Applied physics letters. — 2002. — V.81. — P. 236-245.

5. Litovchenko V., Evtukh A. Vacuum Nanoelectronics In Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices, V.3. Spintronics and Nanoelectronics. — Los Angeles.: ed. by A.A. Balandin and K.L. Wang, American Scientific Publishers, 2006. — P.153–234.
6. Братусь О., Горбанюк Т., Євтух А., Властивості нанокмпозитивних плівок SiO_x та $\text{SiO}_2(\text{Si})$ осаджених методом РЕ CVD // Збірник наукових праць «Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології». — Київ, Україна. — 2007. — Т.5, вип.1. — С.135–147.
7. Oga J. K., Uchida K., Toriumi A., Influence of channel depletion on the carrier charging characteristics in Si nanocrystal floating gate memory // Jpn. J. Appl. Phys. — 2000. — V. 39. — P. 989–993.
8. Hidenori M., Kentaro M., and Kuniyoshi Y., Electron emission from porous silicon planar emitters // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2003. — V.21(4). — P. 1612–1615.
9. Bratus O. L., Evtukh A. A., Lytvyn O. S., Voitovych M. V., Yukhymchuk V. O., Structural properties of nanocomposite $\text{SiO}_2(\text{Si})$ films obtained by ion-plasma sputtering and thermal annealing // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2011. — V. 14(2). — P. 247 — 255.
10. Brodie I., Spindt C. A., Vacuum Microelectronics // Advances in Electronics and Electron Physics. — 1992. — V.83. — P.1–123.
11. Братусь В. Я., Юхимчук В. А., Бережинский Л. И., Валах М. Я., Ворона И. П., Индутный И. З., Петренко Т. Т., Шепелявый П. Е., Янчук И. Б., Структурные превращения и образование нанокристаллитов кремния в пленках SiO_x // Физика и техника полупроводников. — 2001. — V.35. — P. 854 — 864
12. Evtukh A. A., Indutnyy I. P., Litvin Yu. M., Litovchenko V. G., Mazunov D. O., Rasmakin Yu. V., Shepeliyavyy P. E., Electron field emission from SiO_x films // Semicond. Phys., Quantum Electron & Optoelectron. — 2003. — V.6(1). — P. 32–36.
13. Shaw J., Effects of surface oxides on field emission from silicon // J. Vac. Sci Technol. B. — 2000. — V.18(4) — P.1817-18-24.