

**Когдась М.Г.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Притчин С.Е.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Палагін В.А.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Оксанич А.П.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Драгобецький В.В.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Ломонос А.І.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

## УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ МЕХАНІЗМУ УТВОРЕННЯ ПОРУВАТОГО ШАРУ P-SI

У роботі було отримано модель утворення поруватих шарів у слабо легovanому кремнії (p-Si) та сильно легovanому кремнії (n-Si) під час анодного травлення. Застосовуючи комп'ютерне моделювання на дво- та тривимірних сітках, було досліджено вплив параметрів, таких як густина струму, концентрації HF і рівня легування, розміру пор та ймовірність генерації дірок, на морфологію утворених пор. Результати показали, що у p-Si ріст пор відбувається переважно в тонкому передньому шарі через дифузійно-обмежений процес, що призводить до градієнта поруватості. З іншого боку, у n-Si механізм утворення пор схожий на механізм у p-Si через ефекти фокусування електричних полів на лініях пор. При високих густинах струму відбувається утворення великих пор, які формуються під впливом розмірного квантування в кристалічних наночастинках. Розбіжності з експериментальними даними пояснюються ефектами, такими як утворення великих пор в результаті взаємодії із старими порами, а також впливом розмірного квантування, яке може пригнічувати травлення кремнієвих міжпоруватих перегородок. Дослідження вказують на важливі аспекти механізмів утворення пор в різних типах кремнію під час анодного травлення, що може бути корисним для виробництва напівпровідникових пристроїв з макро- та мікропоруватими структурами. Модель дозволяє проводити генерацію пор, що дозволяє розміщувати отвори на будь-якій глибині поруватого шару Si, і активна поверхня більше не обмежується фронтальним шаром. Діаметр пор збільшується до тих пір, поки квантове утримання в кристалічних наночастинках не стане значним. Одночасний ефект генерації пор і квантування розмірів призводить до вирівнювання профілю пористості. Морфологія змодельованих структур на основі вдосконаленої моделі ДЛА близька до експериментальних нанопоруватих структур. Поєднання теплогенерації та квантової локалізації призводить до різних профілів поруватості в напрямку глибини. Розраховані фрактальні розміри змодельованих нанопоруватих структур варіюються від 0,1 до 3, оскільки розмір структури варіюється від 0,3 до 1 нм.

**Ключові слова:** анодне травлення, кремній, пори, модель, легування.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на те, що експериментально поруватий кремній отримують уже давно, тривалий час було незрозуміло, чому розчинення кремнію відбувається переважно на кінцях пор, а не однорідно по поверхні. У низці робіт робилися спроби пояснити переважання утворення пір над електрополіруванням осажден-

ням пасивуючих, нерозчинних силікатів на стінки пір, формуванням збіднених шарів, що концентрують потенціал на кінцях пір, а також утворенням плівки H<sub>2</sub>. Однак на сьогодні не існує моделі, що з єдиних позицій пояснює весь комплекс експериментальних даних щодо утворення поруватого кремнію і, зокрема, зв'язку між умовами

експерименту та морфологічними характеристиками одержуваного кремнію за різних напруг, освітленості, концентрації HF тощо [1, 2].

Розміри пор, що поцятковують кремнієвий електрод у процесі анодного травлення в плавиковій кислоті, перекривають діапазон у чотири порядки (від 2 нм до 20 мкм). Для пояснення різноманітності форм і розмірів пір були запропоновані різні моделі [3]. Утворення найдрібніших поруватих структур інтерпретувалося як самоузгоджене явище, зумовлене збіднінням діркового заряду внаслідок розмірного квантування в поруватій структурі. Однак ці моделі незастосовні на розмірах, що перевищують 10 нм, коли ефекти розмірного квантування нехтувано малі. Отже, різні механізми відповідають за утворення мезо- і макропор. У роботі [4] було показано, що в основі утворення макропор також лежать самоузгоджені явища. Однак, на відміну від випадку збіднення внаслідок розмірного квантування, збіднення носіями заряду на стінках пор пояснювалося тим, що розглядався напівпровідник n-типу. Істотна умова в електрохімії утворення макропор – це рівновага між іонною дифузією в електроліті та доставкою заряду з кремнієвого електрода на кінці пор. Ця умова відсутня при утворенні мікропор. Рівновага настає за характерної величини густини струму, що діє на всіх днах пор під час анодизації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У моделях, розглянутих у роботах [4], покладених в основу моделювання утворення POR-SI, як домінуючий механізм доставки дірок на поверхню кремнієвого анода розглядали дифузію. При цьому ігнорувалися умови анодного травлення, що визначають морфологію структури поруватого шару: рівень легування кремнієвої підкладки, щільність анодного струму, концентрація розчину HF. При розумінні важливої ролі електричного поля в транспорті дірок у процесі анодного травлення, на поточному етапі неможливо побудувати алгоритм комп'ютерного моделювання, що забезпечує точний розрахунок розподілу об'ємного заряду та електричного поля в кремнії та електроліті. Тому при створенні обчислювального алгоритму виникає необхідність використовувати спрощену картину цього розподілу. Так у роботі [9] було прийнято наближення, згідно з яким силові лінії електричного поля фокусуються на кінцях пір, а поле діє на дірку починаючи з фіксованої відстані до найближчого кінця пори. У роботі [6] побічно враховувався ефект окислення кремнію при підвищенні щільності анодного струму, що

призводить до збільшення діаметра пор. Також робилося врахування залежності ймовірності розчинення при досягненні діркою кордону розділу від концентрації HF у розчині електроліту [7]. Однак результати моделювання в зазначених випадках навіть візуально відрізняються від даних просвічувальної електронної мікроскопії (ПЕМ). Тому відомі способи модифікації моделі дифузійно лімітованої агрегації (ДЛА), що застосовувалися з метою врахування не дифузійних механізмів утворення POR-SI, не можна вважати цілком вдалими.

**Метою роботи** є дослідження методу моделювання процесу утворення поруватого кремнію під час анодного травлення, що враховує рівень легування підкладки r-типу, густину анодного струму, концентрацію і температуру розчину HF в електроліті, що підвищить якість одержуваного поруватого кремнію.

**Виклад основного матеріалу.** Припустимо, що морфологія поруватої структури визначається самоузгодженою кореляцією між потенційним і геометричним рельєфом кремнієвого анода. Ця кореляція актуальна в сильно легуваному матеріалі, де можуть виникати області просторового заряду високої щільності та сильні локальні електричні поля. У принципі, в такій постановці відповідь на питання про динаміку формування поруватої структури можна отримати в рамках розв'язання першої та другої задач електродинаміки для розглянутої системи. Однак це потребувало б величезних витрат пам'яті та машинного часу. Тому, замість точного розрахунку просторового розподілу електричних полів і струмів, зробимо акцент на таких ефектах:

– на кінцях (днах) пор електричне поле підвищується через ефект концентрації силових ліній на ділянках з малим радіусом кривизни. Відповідно густина струму на дні пори підвищується порівняно із середньою за об'ємом;

– на дні пори виникає ефект селективного травлення на мікроскопічних нерівностях поверхні кремнієвого анода. Оскільки дно пори є ділянкою підвищеної щільності анодного струму, то в цій ділянці з боку електроліту виникає збіднення заряду іонів. Дірка, опинившись на поверхні розділу, до вступу в електрохімічну реакцію з іоном отримує додаткову можливість здійснити дрейф у напрямку, що визначається зовнішньою напругою. Тому височини на поверхні кремнієвого анода відіграють роль ефективних стоків для дірок і стравлюються насамперед. З іншого боку, підвищення густини струму призводить до

насичення швидкості розчинення, зумовленого тим, що продукти реакції не встигають дифундувати з локальних заглиблень на поверхні кремнію в об'єм електроліту.

Таким чином, область інтенсивного розчинення зміщується з поглиблених ділянок на височини і відбувається саморегульоване вирівнювання розподілу густини струму і рельєфу на доньях пор.

У слабо легovanому кристалі ( $p < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) густина просторового заряду і напруженість локальних електричних полів невеликі. Припустимо, що в цих напівпровідниках ефекти фокусування силових ліній на днах пір і потенційного рельєфу проявляються слабо. Тоді в цих кристалах домінуючим механізмом утворення пор є дифузія, яка добре описується в моделі ДЛА. Однак проведемо модифікацію даної моделі ДЛА, ввівши такі параметри як врахування термічної генерації та рекомбінації дірок, а в нанокристалах – ефект розмірного квантування. Зазначимо, що механізм термічної генерації раніше не брали до розгляду не тільки в комп'ютерному моделюванні, а й під час формулювання фізичної моделі процесу анодного травлення. Оскільки поблизу поверхні кремнієвого анода формується ОПЗ, усередині якої термічна генерація дірок пригнічується внаслідок повної іонізації акцепторних домішок. У слабо легovanому кремнії за низької густини анодного струму густина об'ємного заряду поблизу поверхні невелика, і тому термічною генерацією/рекомбінацією носіїв заряду не можна нехтувати. Розмірне квантування, як відомо, призводить до розширення забороненої зони. У результаті між наночастинками та об'ємним матеріалом виникає енергетичний бар'єр, що перешкоджає проникненню дірок у глиб наночастинок.

Комп'ютерне моделювання утворення пор у p-Si проводиться на двовимірній (160x160) і тривимірній (160x160x80) сітках. Крок сітки відповідає середній міжатомній відстані.

Кожна позиція на сітці позначена як комірка. Крок сітки відповідає реальному розміру поверхневих зарядових індукцій. Обчислювальний алгоритм проілюстровано на рис. 2.

N дірок випадковим чином переносяться сіткою, перестрибуючи через відстань, що дорівнює середньому вільному пробігу. Як тільки дірка знаходиться в радіусі RD від найближчої вершини пори, починається дрейф у напрямку цієї вершини. RD дорівнює радіусу Дебая і виражається в комірках сітки. Після того, як отвір досягає точки на межі поділу фаз, аналіз кривизни межі поділу фаз

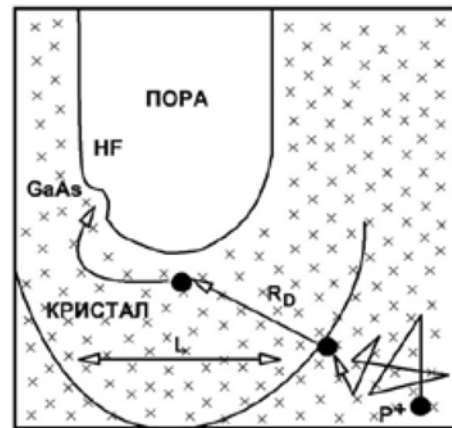


Рис. 1. Ілюстрація обчислювального алгоритму для p1-Si

проводиться в межах інтервалу L від цієї точки. Розчинення відбувається в найбільш помітному виступі на цьому інтервалі. Для того, щоб зв'язати параметр L з параметрами експерименту, використовуємо емпіричне співвідношення [8]:

$$j_{PS} = C_C^{3/2} \exp(-E_A / kT) \quad (1)$$

де критична густина струму  $j_{PS}$  і концентрація HF  $c$  виражені в  $\text{mA}/\text{cm}^2$  і %, відповідно,  $C = 3300 \text{ mA}/\text{cm}^2 \text{ ваг.}\%^{-3/2}$ ,  $E_A = 343 \text{ меВ}$ . Можна оцінити приблизно середній діаметр d пор, зробивши такі припущення: а – густина струму дорівнює  $j_{PS}$  на днах пор і 0 поза ними; б – усі пори мають однаковий діаметр; с – кількість пор на поверхні не змінюється з часом.

Тоді ми отримаємо:

$$j = N_s j_{PS} \pi d^2 / 4 \quad (2)$$

де j – середня густина струму на поверхні шару Si,  $N_s$  – поверхнева густина пор.

З рівняння (2) впливає середній діаметр пор:

$$d = \sqrt{\frac{4j}{\pi C_C^{3/2} N_s} \exp(-E_A / kT)} \quad (3)$$

Параметр L (з кроком сітки) дорівнює d, а потім Рівняння (3).

$N_s$  залежить від довжини Дебая в Si та початкових умов анодування. У слаболегovanому кристалі ( $P < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) густина просторового заряду та локальна електрична напруженість є низькими. Тому вплив потенційного рельєфу на морфологію поруватих структур у p-Si очікувано буде незначним. З цієї причини запропоновані домінуючі механізми пороутворення у формуванні легкованних POR-SI-Si – дифузія, термічна дифузія, теплова генерація та рекомбінація дірок у нанокристалітах і ефект квантового зв'язку. Квантовий зв'язок, як відомо, збільшує ширину забороненої зони. Як наслідок, між об'ємною областю

і наночастинками з'являється бар'єр, який перешкоджає проникненню дірок всередину наночастинки. Розмір, за якого квантовий зв'язок стає значним, позначається  $R_Q$  і дорівнює 10 нм або менше [12]. При моделюванні процесів  $R_Q$  виражається в комітках сітки.

Алгоритм відрізняється від описаного вище: до стрибка дірка може зникнути і з'явитися в іншій точці кристала з імовірністю  $G$ .

Швидкість генерації  $g$  ( $\text{c}^{-1}$ ) пов'язана з  $G$  співвідношенням [12]:

$$g = Gv_0 / l \quad (4)$$

де  $l \sim 10^{-6-7}$  м – довжина вільного пробігу,  $v \sim 10^5$  м/с – середня швидкість дірки. Після досягнення діркою межі розділу в деякій точці, аналізується околиця кристала поблизу неї. Якщо кристал містить сферу радіуса  $R_Q$ , то відбувається видалення частинки кремнію. В іншому разі дірка продовжує випадковий рух.

Пори в n-Si утворюються в результаті фотогенерації. Позитивний просторовий заряд утворюється дірками та іонізованими донорними домішками. Тому зі збільшенням рівня легування ефект фокусування електричного поля на лініях пор посилюється. Це робить механізм утворення макропор у  $n^+$ -Si подібним до механізму утворення макропор у  $p^-$ -Si. Детальний опис на основі n-Si POR-SI є більш складним і не розглядається в даній роботі. Проаналізувавши отримані тривимірні структури було розраховано поруватість як функцію глибини  $h$ :

$$P(h) = N_{PS}(h) / N_j(h) \quad (5)$$

де  $N_{PS}(h)$  – кількість комірок, що містяться в порах у моношарі на глибині  $h$ ,  $N_j(h)$  – загальна кількість комірок у цьому моношарі.

Фрактальну розмірність поруватості структури розраховували методом «пісочниці» [13] як:

$$D(i, j, k) = 3 \log_{ijk^*j^*k^*} (N_{PD}(i, j, k) / N_{PD}(i^*, j^*, k^*)) \quad (6)$$

де  $N_{PD}(x, y, z)$  – кількість паралелепіпедів  $x \times y \times z$  ( $x \leq 1, y \geq 1, z \geq 1$ ), що покривають сітку та містять принаймні хоча б одну кристалічну комірку. Сусідні значення  $(i, j, k)$  та  $(i^*, j^*, k^*)$  відрізняються не більше ніж на одиницю.

Матриця ділянок, отримана за допомогою комп'ютерного моделювання на двовірній сітці ( $160 \times 160$ ), з  $N=80$  показана на рис. 3. Чорний колір відповідає порам. Пори ростуть униз від вершини кожної ділянки. Ефективні параметри  $R_D$  та  $L$  (з кроком сітки) показано для кожного рядка та стовпчика матриці. Видно, що діаметр пор збільшується зі збільшенням  $L$ , що відповідає збільшенню густини струму та/або зменшенню

концентрації HF. Цей результат узгоджується з експериментальними даними [4, 5]. У межах радіуса  $L$  пори є безперервними в плоско-паралельних напрямках, що узгоджується з фотографіями високої роздільної здатності та поперечного перерізу ПЕМ мікро- і мезопоруватих шарів Si [6]. Цей результат пояснюється зв'язком із включенням до моделювання фактора  $L$ , оскільки під час моделювання, заснованого на моделях, що базуються на звичайній ДЛА, отримують лише розгладжені пори [6, 10]. Для  $L=4$  і  $R_D=0$  густина струму є достатньо великою для досягнення полірування. Збільшення  $R_D$  призводить до випрямлення пор і збільшення відстані між ними. За умов  $L=0$  і  $R_D=10$  і 20 напрямом росту майже заданий, оскільки активна зона для кожної пори обмежена її найнижчою точкою. Аналогічні умови були отримані в роботі Lehmann et. al. [9] в n-Si, використовуючи індукуючі ями та зворотне підсвічування.

Залежності поруватості структури від  $N$  не виявлено. Це означає, що пряма аналогія між кількістю дірок у процесі Монте-Карло і концентрацією дірок у реальному кристалі була б помилковою. В експерименті концентрація призводить до низки ефектів (зсув рівня Фермі, екранування Дебая, СКР та ін.), які автоматично не враховуються при моделюванні параметром  $N$ . Матриця плоскопаралельних перерізів змодельованих тривимірних структур ( $160 \times 160 \times 80$ ) для  $N=3000$  наведена на рис. 4. Виявлено близьку візуальну схожість між змодельованим та експериментальним виглядом, отриманим для ФП на підкладці  $p^-$ -Si [11]. Лінії та стовпчики позначені відносними глибинами  $h/h_{MAX}$  та ймовірністю генерації  $G$ , відповідно.  $R_Q$  дорівнював трьом крокам сітки. Чітко видно градієнт поруватості з глибиною, що якісно узгоджується з експериментальними даними, отриманими для POR-SI сильно легуваного бором методом SIMS [8]. Розрахунки показали, що  $dP/dh$  зменшується зі збільшенням  $G$ .

Для того, щоб інтерпретувати цей результат, спочатку пояснимо, чому градієнт виникає в моделі ДЛА без генерації дірок ( $G=0$ ). У дифузійно-обмеженому процесі росту дірки не можуть проникати знизу догори шару, що росте, оскільки вони ефективно захоплюються гілками розгалуженої структури. З цієї причини ріст переважно відбувається в тонкому передньому шарі. Охарактеризуємо його в будь-який момент часу поточною активною поверхнею, визначеною як кількість можливих центрів росту в передньому шарі. Початкова поверхня на межі розділу Si/HF має найбільшу активну поверхню. У міру розвитку клас-

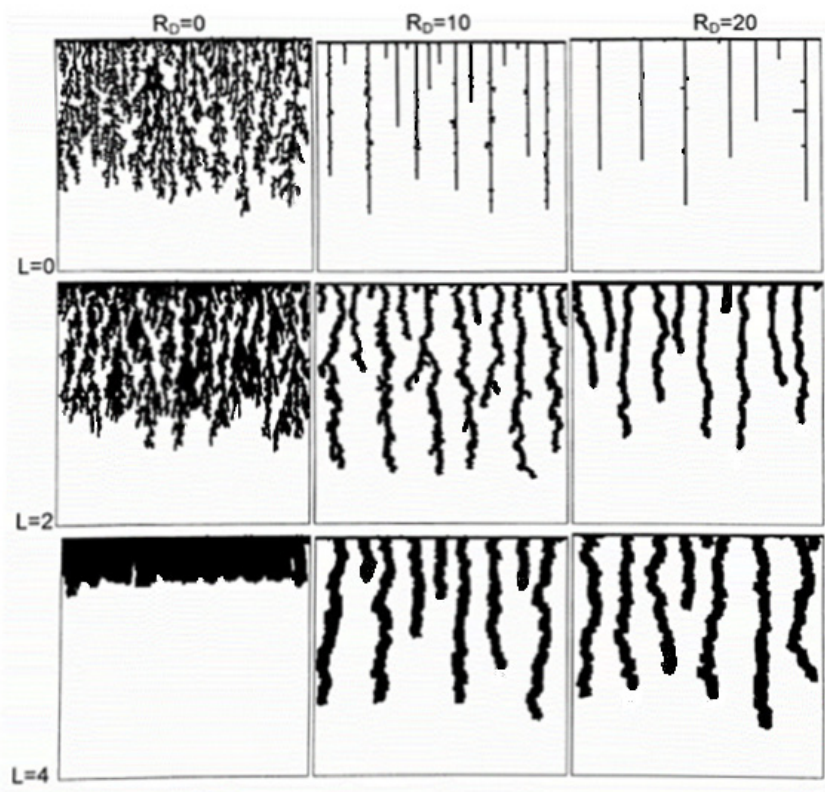


Рис. 2. Матриця графіків комп'ютерного моделювання з варіюванням ефективних параметрів  $L$  і  $RD$  ( $N = 80$ )

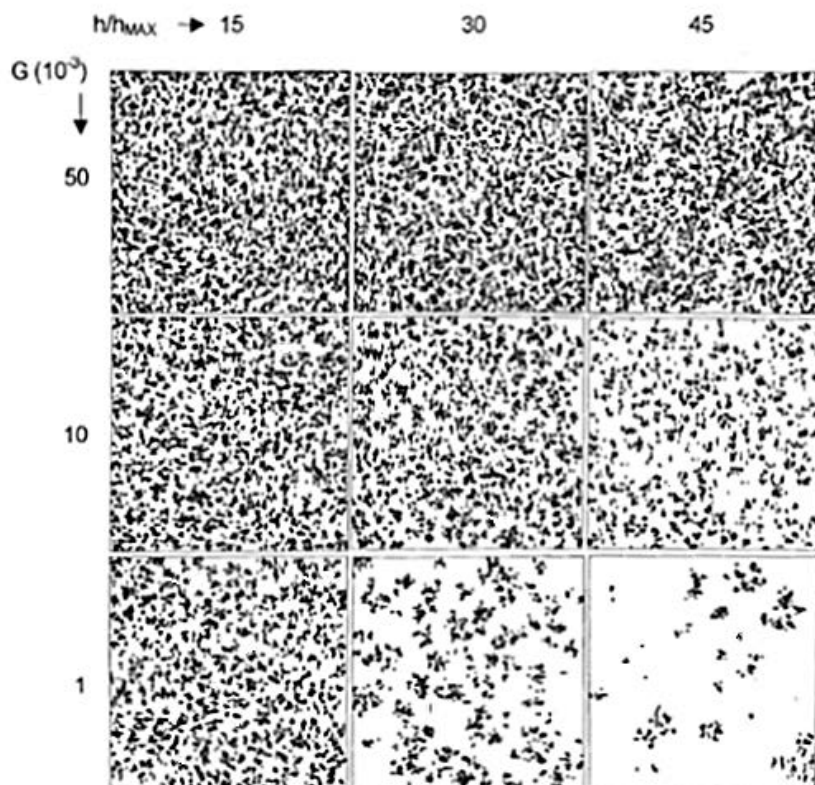


Рис. 3. Матриця комп'ютерного моделювання плоскопаралельних перерізів в залежності від  $h/h_{MAX}$  при зміні ефективного параметра  $G$  ( $R_Q = 3$ )

тера активна поверхня стає меншою (незважаючи на це, вся видова поверхня може збільшуватися). Еволюція активної поверхні визначає профіль поруватості, тому зміна активної поверхні призводить до градієнта поруватості. Генерація отворів дозволяє розташовувати отвори на будь-якій глибині шару POR-SI, і активна поверхня більше не обмежується переднім шаром. Потім діаметр пор збільшується доти, доки квантовий зв'язок у кристалічних наночастинках не стане суттєвим. Таким чином, одночасна дія генерації дірок і розмірного квантування веде до згладжування профілю поруватості. Криві  $P(h/h_{\max})$  для різних  $G=0.05$  представлені на рис. 5, де  $h_{\max}$  – максимальна глибина пор. Фактор  $G$  досить високий, щоб поруватий шар в основній області був однорідним. Різкий нахил поблизу вихідної межі пов'язаний з відмінністю умов зростання пор на початковій поверхні і на деякій глибині. Товщина перехідного шару між поруватим і суцільним кремнієм зменшується зі зростанням масштабу, на якому проявляється розмірне квантування за досить великого фактора термічної генерації ( $G=0.05$ ).

Відмінності в чисельних значеннях поруватості змодельованих і експериментальних [12] структур ми пояснюємо тим, що побудована тривимірною моделлю формально може бути застосована до випадку слабо легovanого кремнію в режимі малих густин анодного струму.

У табл. 1 і 2 наведено порівняння даних моделювання та експерименту [13].

У таб. 1 щільність анодного струму є єдиним змінним параметром. В інтервалі  $2 \text{ мА/см}^2 < j < 40 \text{ мА/см}^2$  спостерігається хороша відповідність. Для відповіді на запитання, чому виникають розбіжності за густини струму вище за  $40 \text{ мА/см}^2$ , необхідно пояснити, що в моделі зна-

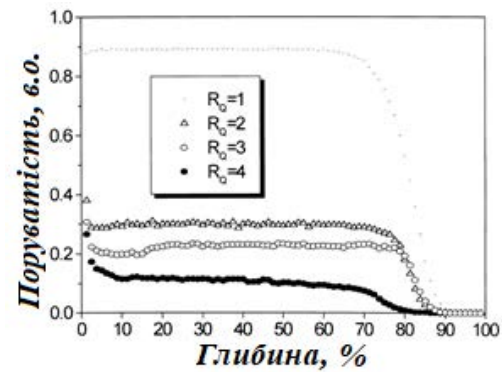


Рис. 4. Поруватість конструкцій, змодельованих на тривимірній сітці, залежно від глибини

чення  $P=100\%$  зумовлено рівністю діаметра пор відстані між ними. В експерименті [2] густина анодного струму вище  $40 \text{ мА/см}^2$  встановлювалася не одразу, а після попередньої стадії формування шару з поруватістю  $P=30\%$  з малим діаметром пор (7–8 нм), середня відстань між якими була  $\sim 12$  нм. Ці пори відігравали роль витратних місць для формування пір більшого діаметра в режимі  $j > 40 \text{ мА/см}^2$ , тому в підлягаючому шарі нові пори не виникали, а відбувалося розширення старих у діаметрі. При цьому для більшості пор виконувалася умова, коли їхній діаметр перевищував міжпорувату відстань, і під старими порами формувалася одна пора великого діаметра (25–100 нм). Якби цей процес відбувався однорідно по фронту зростаючого поруватого шару, то в підлеглому шарі весь кремній був би витравлений. Однак травлення кремнієвих міжпоруватих перегородок товщиною  $\sim 10$  нм пригнічується, мабуть, через ефект розмірного квантування, який у моделі утворення сильно легovanого кремнію не враховувався.

Таблиця 1

Порівняння залежностей поруватості  $P$  від густини анодного струму  $j$ , отриманих у моделі та в експерименті [13]. рівень легування  $p=10^{19} \text{ см}^{-3}$  ( $p=0.006 \text{ Ом-см}$ ,  $RD=1 \text{ нм}$ ), концентрація HF у розчині електроліту  $c=20\%$

$J$ мА/см <sup>2</sup>	$N_s$ см <sup>2</sup>	$D_{\text{мод}}$ нм	$D_{\text{експ}}$ нм	$P_{\text{мод}}$ %	$P_{\text{експ}}$ %
0	-	7±3	-	33	31±2
1	-	7±3	-	33	31±2
2	-	7±3	-	33	35±2
10	$4 \cdot 10^{11}$	7±3	-	33	36±2
18	$4 \cdot 10^{11}$	7.5	7.5±0.5	40	40±3
22	$4 \cdot 10^{11}$	8.3	-	49	46±3
40	$4 \cdot 10^{11}$	11.1	-	88	53±3
60	$4 \cdot 10^{11}$	11.8	-	100	61±3
80	$4 \cdot 10^{11}$	15.8	-	100	65±3
120	$4 \cdot 10^{11}$	19.4	-	100	74±3

Порівняння характерних значень діаметра пор залежно від густини анодного струму  $j$  і концентрації HF у розчині електроліту  $c$ , отриманих у моделі та в експерименті [3]

J, мА/см <sup>2</sup>	Зваг., %	P, см <sup>3</sup>	P, Ом*см	RD, нм	Dмод, нм	Дексп, нм
10	49	1017	0.09	10	2	8±2
10	10	1017	0.09	10	55	40±5
2	49	-	0.01	-	7±3	4±1

**Висновки.** Розроблено модифіковану ДЛА модель утворення POR-Si р-типу. У випадку сильно легovanого кремнію в моделі, крім дифузії дірок, враховано фокусування силових ліній електричного поля на днах пор і механізм селективного травлення на мікроскопічних нерівностях поверхні кремнію. У разі слабо легovanого кремнію в модель закладено, крім дифузії дірок, їхню термічну генерацію/рекомбінацію, а також ефект розмірного квантування в наночастинках кремнію. У р-Si це включає рельєфно-селективний механізм травлення, що враховує залежність морфології мезо- і мікро-ПР (зокрема, діаметра пор) від густини струму, концентрації HF і рівня легування. У р-Si

формування POR-Si ґрунтується на моделі ДЛА, що враховує теплову генерацію/рекомбінацію дірок і ефекту квантового зв'язку в кристалічних наноструктурах. в кристалічних наночастинках з урахуванням теплової генерації/комбінації дірок і ефекту квантового зв'язку. Морфологія структур змодельованих на основі вдосконаленої ДЛА-моделі близька до морфології експериментальних нанопоруватих структур. Поєднання теплової генерації з квантовим зв'язком зумовлює різні профілі поруватості за глибиною. Фрактальна розмірність, розрахована для змодельованої нанопоруватої структури, коливається від 0,1 до 3, оскільки розмір структури варіюється від 0,3 до 1 нм.

#### Список літератури:

1. Mimura H., Matsumoto T., Kanemitsu Y. PL properties of porous Si anodized with various light illuminations. *Appl. Surf. Sci.* 1996. V. 92. P. 396–399.
2. Оксанич А. П., Чебенко В. М., Притчин С. Е., Когдась М. Г., Мащенко М. А. Удосконалення методу отримання поруватих плівок GaAs з використанням нечіткого контролеру. *Радиоелектроніка та інформатика.* 2019. № 2(85). С. 4–8
3. Boehringer M., Artmann H., and Witt K. Porous silicon in a semiconductor manufacturing environment. *J. Microelectromech. Syst.* 2012. V. 21(6). P. 1375–1381.
4. Chen D., Xiuxun H., Xin G. et al. Electrical characterization of Cu Schottky contacts to n-type GaAs grown on (311) A/B GaAs substrates. *Journal of Alloys and Compounds.* 2016. Vol. 84. P. 325–329.
5. Когдась М. Г. Оксанич А.П., Паливода Є. А. Розробка автоматизованої системи визначення спектрів фотолюмінісценції у por-si *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* – 2016. – Вип. 5 (100) частина 2. С. 17–24.
6. B. V.Shulgin, A.N.Tcherepanov, V.Yu. Ivanov, T.S.Koroleva, M.M.Kidibaev, Ch. Pedrini, Ch. Dujardin. Luminescence spectroscopy of NaF:U bulk and fiber crystals. *Journal of Luminescence.* 2007. Vol.125, Iss. 1-2. P. 259–265.
7. M. Haurylau. Modelling of porous silicon formation process. *Materials Science and Engineering.* 2001 Volume 15, Iss. 1–2, P. 117–119
8. E. Xifré-Pérez, T. Trifonov, J. Pallarès, and L.F. Marsal. One-dimensional porous silicon photonic crystals for visible and NIR applications. *Physica Status Solidi.* 2005. 2 (9), P. 3466–3470.
9. V. Agarwal, and J.A. del Río, Tailoring the photonic band gap of a porous silicon dielectric mirror *Appl. Phys. Lett.*, 82, 1512 (2003).
10. C. Pacholski, M. Sartor, M.J. Sailor, F. Cunin, and G.M. Miskelly, Biosensing Using Porous Silicon Double-Layer Interferometers: Reflective Interferometric Fourier Transform Spectroscopy *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 11636 (2005).
11. E. Xifré-Pérez, J. Pallarès, J. Ferré-Borrull, and L.F. Marsal. Guided modes in porous silicon multilayer waveguide structures. *Nanoelectronic and Photonic Systems Workshop. Spain : Tarragona,* 2006.
12. M. Bloemer, G. D'Aguanno, M. Scalora, and N. Mattiucci, Lasers, optics and optoelectronics. *Appl. Phys. Lett.*, 87, 261921 (2005).
13. Reflection Passband Broadening by Aperiodic Designs of EUV/Soft X-ray Multilayers.

**Kogdas M.H., Prytchyn S.E., Palahin V.A., Oksanich A.P., Drahobetsky V.V., Lomonos A.I.**  
**IMPROVEMENT OF THE MODEL OF THE MECHANISM OF FORMATION**  
**OF THE P-SI POROUS LAYER**

*The study investigates the process of pore formation in lightly doped silicon (p-Si) and heavily doped silicon (n-Si) during anodic etching. Utilizing computer modeling on two- and three-dimensional grids, the research explores the influence of parameters such as current density, pore size, and hole generation probability on the morphology of the formed pores.*

*The research methodology involves employing computer simulations on two- and three-dimensional grids to analyze the impact of various parameters on the morphology of pores formed during anodic etching of lightly doped silicon (p-Si) and heavily doped silicon (n-Si). Parameters such as current density, pore size, and hole generation probability were studied.*

*The results indicate that in p-Si, pore growth predominantly occurs in the thin front layer due to a diffusion-limited process, resulting in surface roughness gradients. Conversely, in n-Si, the pore formation mechanism resembles that in p-Si due to electric field focusing effects along pore lines. At high current densities, the formation of large pores takes place, shaped by quantum confinement effects within crystalline nanoparticles. Discrepancies with experimental data are explained by phenomena such as the formation of large pores due to interactions with pre-existing pores and the influence of quantum confinement, which can suppress etching of silicon inter-pore partitions.*

*This research contributes novel insights into the mechanisms of pore formation in different types of silicon during anodic etching. The study explores the effects of various parameters and sheds light on the underlying processes leading to the formation of macro- and microporous structures, enhancing the understanding of semiconductor device production.*

*The findings have practical implications for the production of semiconductor devices with tailored macro- and microporous structures. Understanding the intricacies of pore formation in different silicon types during anodic etching can inform the manufacturing processes, potentially leading to improved semiconductor devices with enhanced properties.*

*The study illuminates crucial aspects of pore formation mechanisms in various types of silicon during anodic etching. The insights gained have practical applications in the fabrication of semiconductor devices, offering opportunities for optimizing their performance and characteristics through controlled pore formation processes.*

**Key words:** anodic etching, silicon, pores, macroporosity, microporosity.