

УДК 621.315.592

### СТРУКТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ, ОТРИМАНІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ

**А. П. Оксанич, М. Г. Когдась, В. М. Чебенко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: beat.2104@mail.ru

Наведено процес отримання поруватого кремнію анодною поляризацією, яке здійснювалося в спеціальних електрохімічних комірках. Корпус комірок, виготовлено з фторопласту, електроди – з платини. Поруватий кремній формувався методом електрохімічного травлення з коротким часом травлення (<2 хв) при струмі до 30 мА см<sup>-2</sup>. Поперечний переріз шару пор-Si можна розділити на три окремі регіони: початкову, середню і нижню області. Початкова область відповідає області в якій були сформовані початкові пори. Середня область являється областю де розчинення просувається в монокристалічному Si, в той час як нижня область відповідає закінченню, що межує з монокристалічним Si. Товщина шару варіюється в межах від 1 до 20 мкм. Встановлено, що діаметр пор і відстань між порами залишається практично незмінним в той час як поруватість збільшується, при збільшенні часу травлення. Встановлено, що зі збільшенням часу травлення збільшується поруватість з 25% до 70%, а також збільшується товщина плівки від 20 до 45 мкм.

**Ключові слова:** напівпровідник, електроліз, поруватість, кремній.

### СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕНОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

**А. П. Оксанич, М. Г. Когдась, В. Н. Чебенко**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: beat.2104@mail.ru

Приведен процесс получения пористого кремния анодной поляризацией, который осуществлялся в специальных электрохимических ячейках. Корпус ячеек, изготовлен из фторопласта, электроды - из платины. Пористый кремний формировался методом электрохимического травления с коротким временем травления (<2 мин) при токе до 30 мА см<sup>-2</sup>. Поперечное сечение слоя пор-Si можно разделить на три отдельные области: начальную, среднюю и нижнюю. Начальная область соответствует области, в которой были сформированы начальные поры. Средняя область является областью, где растворения продвигается в монокристаллическом Si, в то время как нижняя область соответствует окончанию, граничащей с Si. Толщина слоя варьируется в пределах от 1 до 20 мкм. Установлено, что диаметр пор и расстояние между порами остается практически неизменным в то время как пористость увеличивается, при увеличении времени травления. Установлено, что с увеличением времени травления увеличивается пористость с 25% до 70%, а также увеличивается толщина пленки от 20 до 45 мкм.

**Ключевые слова:** полупроводник, электролиз, пористость, кремний.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Останнім часом дослідники проявляють великий інтерес до властивостей композитних середовищ, що представляють собою безліч пов'язаних один з одним нанорозмірних частинок. Дуже часто між наночастинками існують порожнини аналогічного масштабу. Цей інтерес обумовлений можливістю створення на основі таких нанокомпозитів нових матеріалів з бажаними фізичними і хімічними властивостями. Відомо, що характеристики наночастинок дуже сильно відрізняються від властивостей, матеріалів з яких вони утворені.

Одним з перспективних напрямків в сучасній технології напівпровідників є використання низькотемпературних електрохімічних процесів при реалізації базових операцій технологічного циклу виготовлення напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем. В даний час застосовуються електрохімічна поліровка і травлення матеріалів, осадження плівки металів. Удосконалюються методи анодного окислення, що дозволяють отримувати діелектричні плівки для маскування і пасивації поверхні.

У зв'язку з цим особливий інтерес представляють нові матеріали, одержувані при низькотемпературній електрохімічній обробці напівпровідників, зокрема поруватого кремнію (por-Si), котрий формуєть-

ся електрохімічним травленням монокристалічного кремнію.

Утворення на поверхні монокристалічного кремнію темної плівки при його електролітичному травленні в розчинах HF вперше було описано в 1956 р і потім вивчалось багатьма дослідниками. Огляд таких робіт є, наприклад, в. Інтерес до вивчення механізму утворення цих плівок багаторазово посилювався після опублікування в 1990 р роботи Кенема (Canham) [1], котрий спостерігав інтенсивну червоно-помаранчеву фотолюмінесценцію таких плівок і який пояснив її виникнення квантово-розмірним ефектом в нанокристалітах кремнію. Він же запропонував оригінальний механізм утворення люмінуючих плівок, які отримали назву поруватого кремнію (por-Si).

Найбільш відомим і часто вживаним способом приготування пор-Si є електролітичний [2]. Пластина кремнію поміщується в електролітичну ванну, що містить водний розчин плавикової кислоти HF зазвичай в суміші з етиловим або ізопропіловим спиртом. В якості контрелектрода застосовується пластина (сітка, спіраль) з будь-якого металу, що не взаємодіє з плавиковою кислотою, найчастіше з платини. Між кремнієвою пластиною і контрелектродом надається напруга від зовнішнього джерела струму (плюсом до кремнієвої пластини), достатню

для підтримки певної щільності струму, що зазвичай знаходиться в залежності від необхідних результатів в межах  $1 - 100 \text{ mA} / \text{cm}^2$ . При цьому відбувається розчинення (травлення) кремнію з утворенням  $\text{por-Si}$ .

Останнім часом з'явився ряд нових підходів до проблеми зародження пор. Перш за все це теоретичні роботи, що показують можливу нестабільність плоскої межі розділу напівпровідник / електроліт по відношенню до малих збурень, що виникають в процесі електролізу. Передбачається, що оптимальна довжина хвилі цих збурень визначає собою порядок величини відстаней між порами [3, 4]. Ряд авторів пов'язують початковий етап пороутворення з виділенням газоподібного водню при електролітичному розчиненні Si, який утворюється при окисленні з'єднань двовалентного кремнію іонами водню.

Метою роботи є розробка технології отримання шарів поруватого кремнію з необхідними параметрами для подальшого використання цих плівок в якості чутливих шарів датчиків газів.

#### МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Отримання поруватого кремнію анодною поляризацією здійснюють в спеціальних електрохімічних комірках [5, 6]. Корпус комірок, як правило, виконують з фторопласту, електроди – з платини. Конструкції комірок найрізноманітніші, але принципово за способом підведення електричного потенціалу до досліджуваного зразка їх можна розділити на два типи: комірки з механічним і комірки з рідинними контактами. Найпростіше реалізувати конструкції комірок з механічним контактом до досліджуваного зразка. Такі комірки використовуються найбільш часто. Істотним недоліком цих комірок являється те, що через неоднакове падіння напруги по поверхні напівпровідникового зразка властивості поруватих шарів різні в різних точках поверхні. Тому доводиться на зворотній бік кремнієвих зразків наносити металеві покриття, які далеко не всі стійкі до дії розчинів плавикової кислоти. В іншому випадку можливе отримання рівномірних за поверхні поруватих шарів на малих площах (одиниці  $\text{mm}^2$ ).

Комірки з рідинним контактом позбавлені описаного недоліку. Але через складність в герметизації кремнієвого зразка між двома камерами з розчинами плавикової кислоти вони використовуються рідко. Відомо одне застосування таких комірок в методі Унно-Імаї при отриманні поруватих шарів на кремнієві [7]. Однак конкретних описів конструкцій комірок, що реалізують рідинний контакт, за винятком їх схематичного зображення, виявити не вдалося. Автори [8] розробили кілька типів електрохімічних комірок широкого функціонального призначення, що дозволяють формувати поруватий кремній і проводити інші хімічні і електрохімічні процеси. Їм вдалося показати можливість заміни в визначених умовах дорогих платинових електродів на електроди, виконані з нікелю. Були вирішені конструкторські завдання за способом підведення світлової енергії в зону хімічної реакції, методику регулювання напруженості електричного поля в реакційній зоні, розширенню функціональних можливостей комірки.

Відомо, що на морфологію пори впливає багато факторів. До них можна віднести тип провідності монокристалічного кремнію, кристалографічну орієнтацію вирізаних пластин, питомий опір, тип легуючої домішки, світловий режим (довжина хвилі використовуваного світла, інтенсивність освітлення, тривалість і скважність світлових імпульсів і т.і.), щільність струму, тривалість процесу анодування, склад електроліту і ін. Вирішуючи ці проблеми, автори робіт [9–11] спробували по можливості обмежити спектр факторів, що можуть впливати і розглядати структуру, що залежить від одного якогось основного на даний момент фактору. Так, в якості об'єкта дослідження були взяті пластини монокристалічного кремнію, вирізані з зливка в напрямку (100), n-типу провідності і питомого опору  $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Якщо занурити в розчин плавикової кислоти кремнієвий зразок-електрод і будь-який інший метал – платину, срібло, мідь – в якості контрелектрода, то достатньо замкнути зовнішній ланцюг, т. е. забезпечить електричний зв'язок між двома електродами, як почнеся проходження струму в цьому ланцюзі і розчинення одного з електродів. Відомо, що кремній є вельми реакційноздатним елементом. Хоча його поверхня практично завжди покрита пасивуючими шарами (оксиду, гідроксидів, водню і т.і.), тим не менше в парі з іншими більш електропозитивними матеріалами виникаючий в короткозамкненому ланцюзі струм забезпечить розчинення саме кремнію, і при певній щільності струму має розпочатися утворення  $\text{por-Si}$ .

Щільність струму на кремнієвому зразку визначає не тільки швидкість утворення  $\text{por-Si}$ , а й істотно впливає на його структуру і багато фізичних характеристик. Тому велике значення має можливість регулювати щільність струму в даному процесі. В принципі щільність струму може регулюватися декількома способами. Очевидно, що домогтися збільшення величини струму в ланцюзі можна як за рахунок збільшення ЕРС, так і за рахунок зменшення опору ланцюга. Збільшити електродний потенціал кремнію (а, отже, і ЕРС) можна шляхом введення в електроліт будь-якого окислювача. При цьому виникає «примусова» екстракція електронів з зразка на іони (молекули) окислювача і відповідно збільшується потенціал кремнію щодо обсягу розчину. Що ж стосується опору короткозамкненого ланцюга, то він складається з нелінійних опорів міжфазних переходів кремній – електроліт і електроліт – контрелектрод, а також з омичних опорів зразка і електроліту. Величина міжфазних переходів в свою чергу визначається як рівноважними міжфазними стрибками потенціалів, так і деякими додатковими перенапруженнями, пов'язаними з обмеженою швидкістю електродних реакцій. Нагадаємо, що для проходження струму в електролітичній комірці на обох електродах обов'язково повинні протікати хімічні реакції. На одному з електродів (аноді) відбувається окислювальний процес – розчинення кремнію, на іншому (катоді, або контрелектроді) – відновлення будь-яких компонентів електроліту. За відсутності окислювачів на контрелектроді реально

можуть відновлюватися тільки іони водню з утворенням газоподібного водню. Цей процес вимагає значних енергетичних витрат і тому здатний гальмувати весь електрохімічний процес. У той же час більшість окисників відновлюється значно легше, ніж іони водню. Тому і з цієї точки зору введення до складу електроліту різних окислювачів може виявитися вельми бажаним. Відзначимо, що в цьому випадку збільшення струму в короткозамкненому ланцюзі забезпечується за рахунок зміни характеру реакції не на кремнієвому електроді, а на контрелектроді.

В якості вихідного матеріалу використовувалися: пластини кремнію n- Si (табл. 1).

Електрохімічне травлення кремнію проводилося в гальваностатичному режимі (при постійному струмі).

У такому режимі швидкість росту плівки на поверхні кремнієвого анода лінійно залежить від щільності анодного струму:

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta t} = \frac{jM\eta}{nF\rho} \quad (1)$$

де  $\Delta\delta$  – приріст товщини плівки;  $j$  – щільність анодного струму;  $M$  – молекулярна маса оксиду в плівці;  $n$  – число електронів, які втрачаються атомом кремнію;  $\eta$  – вихід за струмом;  $F$  – число Фарадея;  $\rho$  – щільність плівки.

При цьому для підтримки процесу росту плівки потрібне постійне збільшення напруги між анодом і катодом зі швидкістю:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta U}{\Delta\delta}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta t}\right) = \xi_{dif} \cdot \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \quad (2)$$

де  $\xi_{dif}$  – диференціальна напруженість поля.

Звідси за умови  $\xi_{dif} = \text{const}$  випливає, що залежність швидкості росту падіння напруги в плівці від її товщини (або від часу процесу поляризації анода постійним струмом) є лінійною. Відхилення зазначеної залежності від лінійності свідчить про зміну складу плівки (змінюються  $M$ ,  $n$ ,  $\rho$ ) або її провідності (змінюються  $\xi_{dif}$ ,  $\eta$ ) чи розчиненні сполук плівки. У гальвано-статичному режимі на постійному струмі повинна спостерігатися лінійна залежність логарифму іонного струму від падіння напруги в плівці.

У табл. 1 наведені режими анодного електрохімічного процесу виготовлення шарів p<sup>+</sup>-Si, використані в цій роботі.

Освітлення кремнієвої положки при електрохімічному травленні прискорює хімічний процес взаємодії електроліту з шаром утвореного p<sup>+</sup>-Si [6]. Поруватість шару помітно зростає зі збільшенням інтенсивності освітлення. Причому спектральний склад випромінювання істотно не впливає на поруватість. Для освітлення поверхні підкладки при зростанні шарів p<sup>+</sup>-Si було використано природне освітлення, лампу розжарювання з вольфрамовою ниткою потужністю 20 Вт.

Процес анодування проводили в комірці, схема якої представлена на рис. 1.

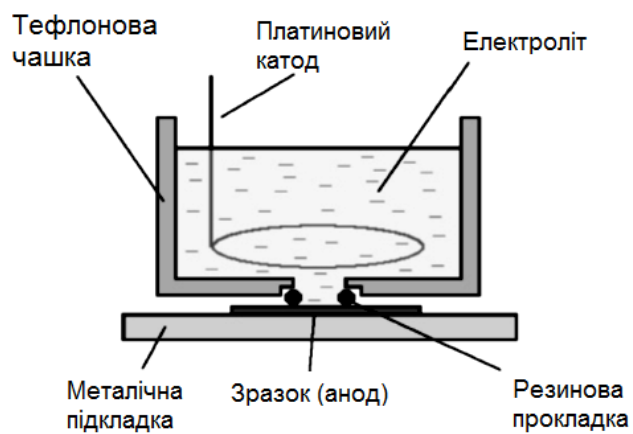
Таблиця 1 Режими анодного електрохімічного травлення кремнію при виготовленні шарів ПК

№ п/п	Параметри кремнієвої підкладки			Параметри електрохімічного процесу	
	Тип	$\rho$ , Ом·см	Кристаліграфічна орієнтація	Склад електроліту	J, мА/см <sup>2</sup>
1	n	1	(100)	HF(40 %): C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH = 1:1	20
2	n	4,5	(111)	HF(40 %): C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH = 1:2	10
3	n	10	(100)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : HF : C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH = 1:1:3	5
4	n	2-4	-----	H <sub>2</sub> O : HF : C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH = 1:1:2	10
5	n	1	(111)	HF : H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 1:1	8

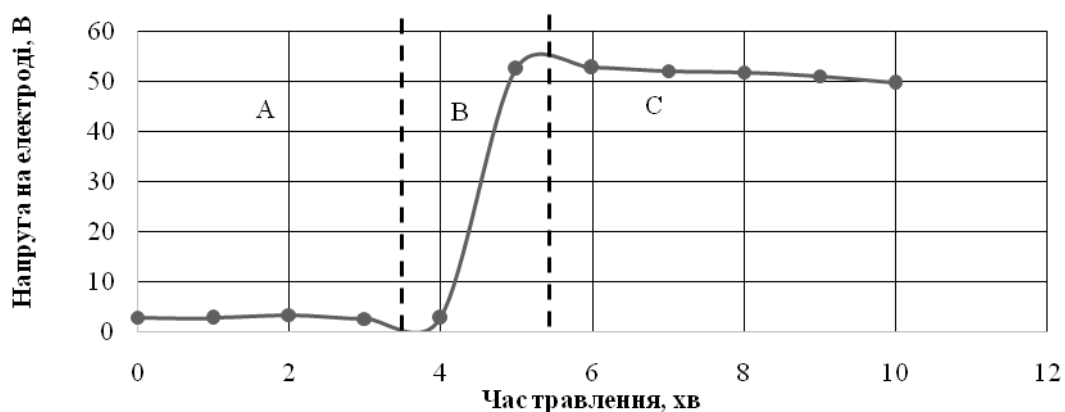
Процес зростання шару p<sup>+</sup>-Si можна пояснити слідувачим чином. Кордон розділу напівпровідник / електроліт представляє собою випрямляючий контакт, за властивостями близький до діода Шоттки, тому слід використовувати модель фотодіода при зворотному зміщенні. Завдяки поглинанню світла в зростаючому шарі p<sup>+</sup>-Si освітленість області просторового заряду (ОПЗ) кристалічної кремнієвої підкладки зі збільшенням товщини p<sup>+</sup>-Si поступово зменшується, що призводить до зниження темпу генерації носіїв (рис. 2).

Ділянка А на рис. 2 відповідає високій освітленості кордону електроліт / напівпровідник, коли кількість генеруючих світлом дірок істотно більше, ніж необхідно для забезпечення заданого струму. Ділянка В характеризує недостачу генерованих сві-

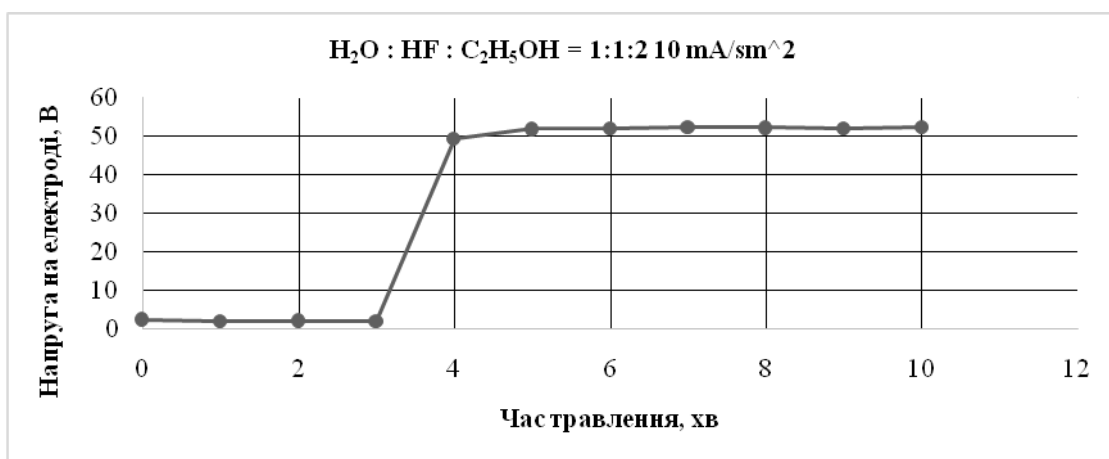
тлом дірок. Тут починається лавинний пробій. Ділянка С відповідає дуже низької освітленості на кордоні електроліт / напівпровідник. Підтримання заданого струму в умовах недостатньої освітленості може бути забезпечене не тільки за рахунок лавинного пробію. Зростання напруженості електричного поля на межі електроліт / напівпровідник може призводити до тунелювання електронів, які знаходяться в розчині іонів або атомів в зону провідності кремнію. При цьому на аноді повинна протікати електрохімічна реакція, яка веде до вивільнення електронів. Утворення p<sup>+</sup>-Si сповільнюється, так як в ході реакції виділяється кисень, а кремній розчиняється. Отже, на цьому етапі електролізу головним механізмом генерації носіїв є лавинна іонізація. При цьому зростання шару p<sup>+</sup>-Si може тривати в темряві.



Рисунк 1 – Схематичнє зєбрєжєннє кємїркї длє єнєдувєннє



а)



б)

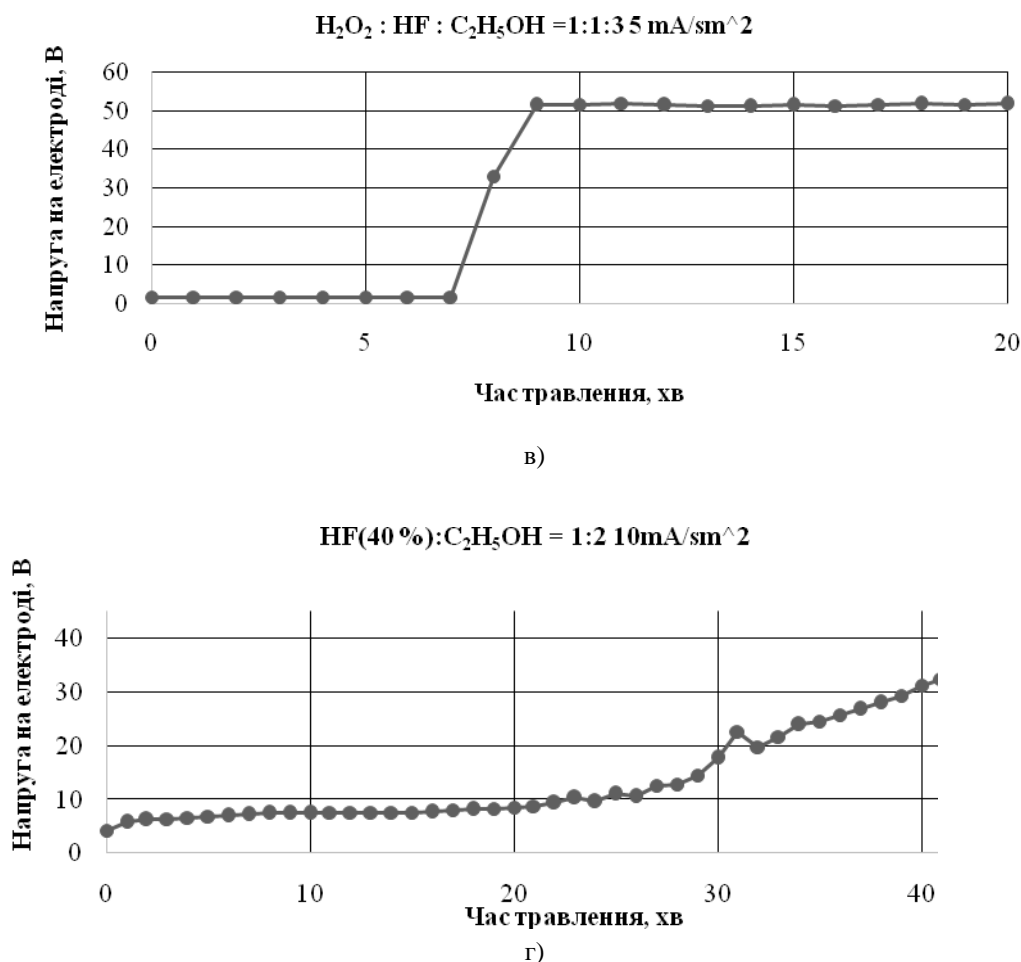


Рисунок 2 – Залежності напруги на електроді від тривалості електролізу при параметрах, наведених в табл. 1

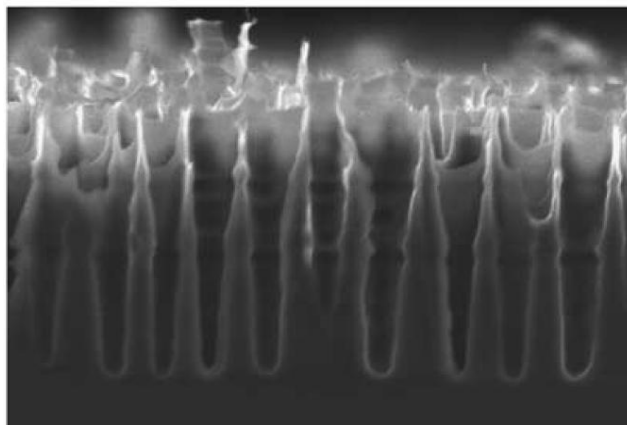
Якщо підкладка висвітлюється випромінюванням, яке містить ІЧ-складову, то стрибок напруги В (рис. 2 г) відсутній. ІЧ-складова достатньо вільно проходить крізь шар  $\text{por-Si}$  і забезпечує необхідний темп генерації носіїв струму в підкладці і утворення шару  $\text{por-Si}$ .

На основі мікрофотографій СЕМ, поперечний переріз шару  $\text{por-Si}$  можна розділити на три окремі регіони: початкову, середню і нижню області. Початкова область відповідає області в якій були сформовані початкові пори в поверхні кремнієвої підкладки. Середня область являється областю де розчинення просувається в монокристалічному  $\text{Si}$ , в той час як нижня область відповідає закінченню, що межує з монокристалічним  $\text{Si}$ . Верх шару  $\text{por-Si}$  володіє хаотичною крихкою структурою. Товщина шару варіюється в межах від 1 до 20  $\mu\text{m}$ , сам шар пронизаний численними вертикальними каналами-порами (стовпчаста структура) діаметром в сотні нанометрів.

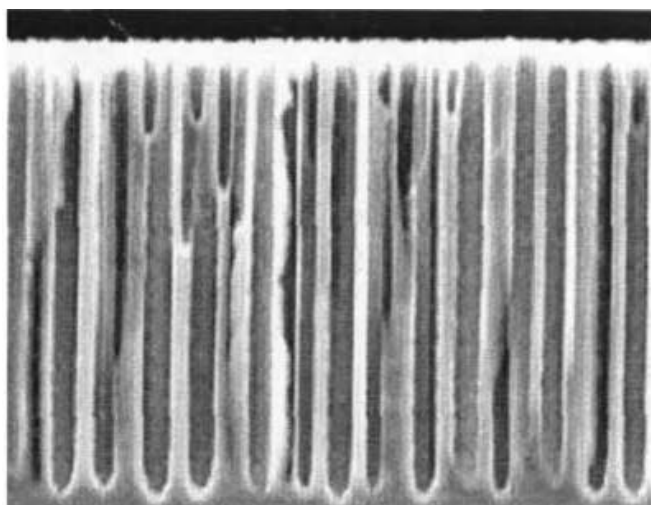
На рис. 3 представлено СЕМ-зображення плівок  $\text{por-Si}$ , отриманих при режимах анодування зазначе-

них в табл. 1. Із малюнків видно, що розміри кристалітів кремнію змінюються в межах 20–45 нм.

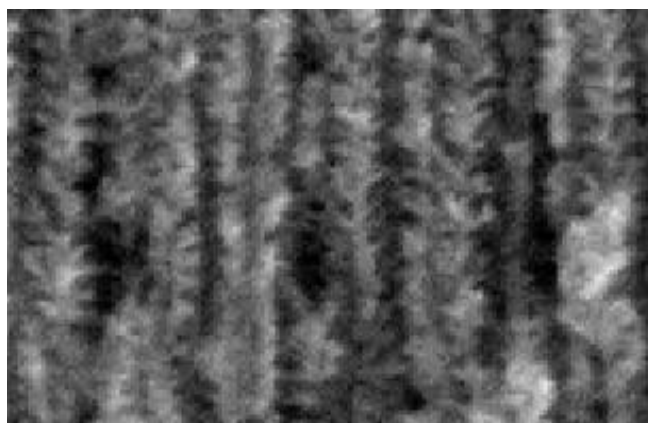
Відмінності в морфології трьох областей  $\text{por-Si}$  були в основному через ефект розчинення  $\text{Si}$ , який стався на кордоні розділу  $\text{Si}$ -електроліт. Цей процес розчинення був найбільш активним на кордоні розділу. Там існують два типи розчинення: а саме електрохімічне і хімічне. Як правило, електрохімічне розчинення виникає з двох типів електрохімічних реакцій. Перша пряма - електрохімічне розчинення, де  $\text{Si}$  поверхня піддається впливу  $\text{HF}$ , утворюючи таким чином нестабільні  $\text{SiF}_4$  молекули. Проте, ці нестабільні молекули реагуючи далі з  $\text{HF}$  призводить до більш стабільної  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ . Другим типом розчинення є електрохімічне окислення  $\text{Si}$  гідроксильними іонами, що призводить до утворення оксидних шарів. Остання реакція являється інертною по відношенню до подальших електрохімічних процесів. Тим не менш, вона може піддаватися хімічному розчиненню в  $\text{HF}$ .



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Фотографії поперечних відколів зразків з різною тривалістю росту шарів пор-Si:  
 а) - експеримент № 3; б) - експеримент №1; в) - експеримент №2

Слід зазначити що ці реакції, тобто, електротрохімічне розчинення і пряме окислення, в основному визначаються числом пор, які знаходяться в підкладці Si. Електрохімічне окислення вимагає більше пор в порівнянні з прямим електрохімічним розчиненням. У цій роботі, прогрес обох реакцій залежать від часу травлення.

Утворення пор в напрямку  $\langle 100 \rangle$  було пов'язано з електрохімічним розчиненням, яке сталося через пори в підкладці Si. Висока щільність струму, кот-

рий наводить сильне електричне поле, яке в свою чергу надає ефект поляризації на кремнієвій підкладці. Пори мали тенденцію до накопичення на дефектних ділянках поверхні в результаті електронного збудження Si. Ці пори переважно накопичуються на кінчику пори межуючи з монокристалічним Si через низький рівень бар'єру потенційної енергії в порівнянні з верхніми ділянками. Таким чином, в результаті розчинення Si в цьому місці, утворюючи пори стовпчастих структур в напрямку  $\langle 100 \rangle$ .

По мірі протікання електрохімічного процесу розчинення, реакція також протікала в напрямку <111>, створюючи бічні гілки від головної пори. Це було пов'язано з наявністю більшої кількості отворів в цьому напрямку. Однак, розчинення в цьому напрямку припиняється. Це обумовлено високим енергетичним бар'єром, створюючи між порами відстані котрі стали меншими з прогресом розчинення.

З іншого боку, збільшення діаметра пор від початку до нижньої області було пов'язано зі зменшенням концентрації HF з глибиною пор. Це було викликано обмеженим поширенням HF у близькій до поверхні області. Відповідно, перенесення маси в пори відбувається тільки за рахунок дифузії. Добре відомо, що дифузія є процесом залежності від часу, і, отже, збільшення часу травлення призведе до скорочення потоку молекул HF в нижній області. Отже, нижня область пори буде заповнена більш низькою концентрацією HF електроліту в порівнянні з об'ємним електролітом.

Крім того, через низьку концентрацію HF, щільність критичного струму (JPS) була знижена на кінчику пори. Це сприяло окисленню на поверхні Si за рахунок накопичення надлишкових дірок від постійної щільності струму і використаної освітленості. На цьому етапі, розчинення тільки хімічне, і хімічне розчинення оксидного шару відбувається ізотропно. В результаті пори стінки в нижній області були згладжені і стали ширше.

Після отримання шарів por-Si були оцінені його поруватість і товщина шарів. Поруватість визначається як частка пустот в шарі поруватого кремнію і може бути легко обчислена гравіметричним методом (методом зважування). Для цього зразки зважуються до анодування ( $m_1$ ), після анодування ( $m_2$ ) і після зняття шару поруватого кремнію в 3% KOH ( $m_3$ ). Поруватість визначалася за наступною формулою:

$$P(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (3)$$

Використовуючи значення щільності кремнію, можна знайти товщину плівок поруватого кремнію:

$$d = (m_1 - m_3) / \rho S \quad (4)$$

де S – площа протравленої поверхні,  $\rho$  – густина кремнію.

Результати вимірювань показали збільшення пористості з 25% до 70% зі збільшенням часу травлення, а товщина плівок змінюється від 20 до 45 мкм. Приріст поруватості було обумовлено посиленням розчинення Si. Маса розчиненого Si збільшилася за рахунок чи то активного електрохімічного, чи хімічного розчинення з часом травлення. Вважається що це відбувається на межі розділу por-Si, що узгоджується з попередніми зауваженнями щодо діаметру пор, щільності пор і відстані між порами.

Із рис.3 видно, що поруватість зростає з ростом, відповідно, часу анодизації (порівняно слабо) і щільності струму (сильніше).

Товщина плівки зростає з ростом часу анодування і щільності струму, причому, якщо спостерігається приблизно лінійне зростання товщини плів-

ки з часом, то починаючи з деякої критичної щільності струму, товщина плівки різко зростає.

Закономірність залежності товщини плівки від концентрації HF в розчині не визначена. Можна тільки припустити, що товщина плівки від даного параметру майже не залежить.

**ВИСНОВКИ.** Отримано por-Si з кремнієвих пластин n-типу відповідно до періодів часу короткого травлення, від 30 до 120 с, і при не високій щільності струму до 30 мА см<sup>-2</sup>. Уточнено наукові дані про поруватість por-Si і встановлено, що діаметр пор і відстань між порами залишається практично незмінним в той час як поруватість збільшується, при збільшенні часу травлення. Встановлено, що зі збільшенням часу травлення збільшується поруватість з 25% до 70%, а також збільшується товщина плівки від 20 до 45 мкм.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Canham L. T. Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers, Appl. Phys. Lett., 1990, vol. 57, pp.1046–1048.
2. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics, Surf. Sci. Rep., 2000, vol. 38, no. 1, pp. 1–126.
3. Setzu S., Solsona P., Letant S., Romestain R., Vial J.C. Microcavity effect on dye impregnated porous silicon samples, Eur. Phys. J. Applied Physics, 1999, vol. 7, pp. 59–63.
4. Pavesi L., Panzarini G., Andreani L.C. All-porous silicon-coupled microcavities: experiment versus theory, Phys. Rev. B, 1998, vol. 58, no. 23, pp. 15794–15800.
5. Parkhutik V., Ibarra E. The role of hydrogen in the formation of porous structures in silicon, Mater. Sci. Engineer. B, 1999, vol. 58, no. 1–2, pp. 95–99.
6. Кашкаров П.К. Необычные свойства пористого кремния // Соросовский Образовательный Журнал – 2001. – № 1. – С. 102–107.
7. Зимин С.П. Пористый кремний – материал с новыми свойствами // Соросовский образовательный журнал – 2004. – Т. 8. – № 1, С. 101–107.
8. Формирование двухсторонней пористой структуры при электрохимическом травлении кремния методом УнноИмаи / С.П. Зимин, М.Н. Преображенский, Д.С. Зимин // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – Вып. 1. С. 24–29.
9. Pavesi L. Porous silicon microcavities, La Rivista del Nuovo Cimento, 1997, vol. 20, ser. 4, no. 10, pp. 1–76.
10. Метелкин Ю.С., Пацков А.В., Жарников Д.А., Юзова В.А. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. / Под. ред. А.И. Громыко, А.В. Сарафанова. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. С. 314–317.
11. Lehmann V., Stengl R., Luigart A. On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon, Mat. Sci. Eng. B, 2000, vol. 69-70, pp. 11–22.

**STRUCTURAL PROPERTIES OF POROUS SILICON  
RECEIVED BY ELECTRIC CHEMICAL CONTROL METHOD**

**A. Oksanich, M. Kogdas, V. Chebenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: beat.2104@mail.ru

**Purpose.** To investigate the change in PS morphology, to investigate the formation of pores and “porous silicon” for a wide spectrum of potential applications since the discovery of the unexpected optical properties of microporous Si in 1990. **Methodology.** For this reason, it has been decided that the present study should be performed using a current density of  $30 \text{ mA cm}^{-2}$ . Discussions on how other properties such as the PS thickness, pore diameter, pore density, porosity and surface roughness are influenced by the etching time are also presented. Finally, these properties are related to the electrical characteristics of the obtained PS. **Results.** The scientific data on the porosity of the PC have been specified and it has been established that the pore diameter and the distance between the pores remain practically unchanged while the porosity increases with increasing etching time. **Originality.** It has been found out that with increasing etching time, the porosity increases from 25% to 70%, and the film thickness increases from 20 to 45  $\mu\text{m}$ . **The practical value.** The proposed method will improve the quality produced by por-Si, which is used in the manufacture of various gas sensors.

**Key words:** semiconductor, electrolysis, porous, silicon.

REFERENCES

1. Canham, L. T. (1990), “Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 1046-1048.
2. Bisi, O., Ossicini, S., Pavese, L. (2000), “Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics” *Surf. Sci. Rep.*, vol. 38, no. 1, pp. 1-126.
3. Setzu, S., Solsona, P., Letan, S., Romestain, R., Vial, J.C. (1999), “Microcavity effect on dye impregnated porous silicon samples” *Eur. Phys. J. Applied Physics*, vol. 7, pp. 59-63.
4. Pavese, L., Panzarini, G., Andreani, L.C. (1998), “All-porous silicon-coupled microcavities: experiment versus theory” *Phys. Rev. B*, vol. 58, no. 23, pp. 15794-15800.
5. Parkhutik, V., Ibarra, E. (1999), “The role of hydrogen in the formation of porous structures in silicon” *Mater. Sci. Engineer. B*, vol. 58, no. 1-2, pp. 95-99.
6. Kashkarov, P. K. (2001), *Neobychnyye svoystva poristogo kremniya* [Unusual properties of porous silicon], *Soros Educational Journal*, vol. 1, pp. 102-107.
7. Zimin, S. P. (2004), *Poristyy kremniy – material s novymi svoystvami* [Porous silicon – material with new properties], *Soros Educational Journal*, vol.8, no. 1, pp. 101- 107.
8. Zimin, S. P., Preobrazhensky, M. N., Zimin, D. S. (2000), *Formirovaniye dvukhstoronney poristoy struktury pri elektrokhimicheskom travlenii kremniya metodom UnnoImai* [Formation of a two-sided porous structure in the electrochemical etching of silicon by the method of Unno-Imai], *Technical Physics Letters*, vol. 26, no. 1, pp. 24-29.
9. Pavese, L. (1997), “Porous silicon microcavities” *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 20, ser. 4, no. 10, pp. 1-76.
10. Metelkin, Yu. S., Patskov, A. V., Zharnikov, D. A., Yuzova, V. A. (2009), *Sovremennyye problemy radioelektroniki* [Modern problems of radio electronics: Sat. Scientific. Tr.], *Krasnoyarsk: IPK SFU*, pp. 314 – 317.
11. Lehmann, V., Stengl, R., Luigart, A. (2000), “On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon” *Mat. Sci. Eng. B*, vol. 69-70, pp. 11-22.

Стаття надійшла 17.03.2017.