

**ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ФТОРИСТОВОДНЕВОЇ ТА СОЛЯНОЇ КИСЛОТИ
НА МІКРОСТРУКТУРУ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ***Запорізька державна інженерна академія,*⁽¹⁾*Казенне підприємство «Запорізький титано-магнієвий комбінат»*

Исследовали влияние концентрации фтористоводородной и соляной кислот в составе электролитов $HF:H_2O:C_2H_5OH$ и $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$ на толщину, пористость и морфологию пористого кремния. Установлено, что реакция анодирования в системе электролит « $HF:H_2O:C_2H_5OH$ – кремний» в первые несколько секунд может осуществляться в одной из трех кинетических областей: электрополировка – переходная область – порообразование. Анодирование в системе «электролит $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$ – кремний» происходит на участке порообразования. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования соляной кислоты как дополнительного компонента для управления свойствами пористого кремния.

Досліджувався вплив концентрації фтористоводневої та соляної кислот у складі електролітів $HF:H_2O:C_2H_5OH$ та $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$ на товщину, поруватість та морфологію поруватого кремнію. Встановлено, що реакція анодування в системі електроліт « $HF:H_2O:C_2H_5OH$ – кремній» протягом перших декілька секунд може відбуватися в однієї з трьох кінетичних ділянок: електрополірування – перехідна ділянка – пороутворювання. Анодування в системі електроліт $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$ – кремній відбувається на ділянці пороутворення. Одержані демонструють можливість використовувати соляної кислоти як додаткового компонента для керування властивостями поруватого кремнію.

Вступ. Перше повідомлення про створення системи пор в монокристалічному кремнії за допомогою низки електрохімічних реакцій, привернуло увагу дослідників до нового класу матеріалу - поруватого кремнію (ПК) [1]. Надалі увага до ПК значно зросла завдяки його різноманітному використанню в електроніці, наприклад, для створення повної діелектричної ізоляції елементів ІС [2,3], для гетерування точкових дефектів, як низькоомні ділянки високовольтних транзисторів, для створення поглинальної поверхні в сонячних елементах [4], в інтегральних оптичних хвильоводах [5], як детекторів надвисокочастотного електромагнітного випромінювання [6], як газочутливих сенсорів [7]. З того часу, як було виявлено ефект фотолюмінесценції в ПК при кімнатній температурі [8] і з'явилася перспектива його використання в оптоелектроніці, цей матеріал знову привернув до себе неабияку увагу серед значної кількості дослідників, вивчаючих властивості ПК, одержаного за допомогою електрохімічного анодування [9-13]. Плівки ПК, що одержані за допомогою електрохімічного травлення, є складним матеріалом, для якого такі фізичні параметри, як розмір пор, об'ємна пористість, товщина визначаються наступними умовами виготовлення: густиною струму, складом травника, часом травлення, рівнем освітлення, властивостями кремнію [14-25]. В цих роботах повідомляється про дослідження морфології, товщини, поруватості, оптичних властивостей шарів ПК, виготовлених у звичайних спиртово-водних розчинах на основі фтористоводневої кислоти (HF). Проблема дослідження процесів пороутворення на первинному етапі електрохімічного розчинення, який триває протягом перших декілька секунд, є важливою з точки зору визначення напрямку хімічних реакцій: електрополірування – перехідна ділянка – пороутворення, оцінки кількісних параметрів рельєфу поверхні, товщини, поруватості кремнію. Результати цих досліджень можуть бути використані, в тому числі,

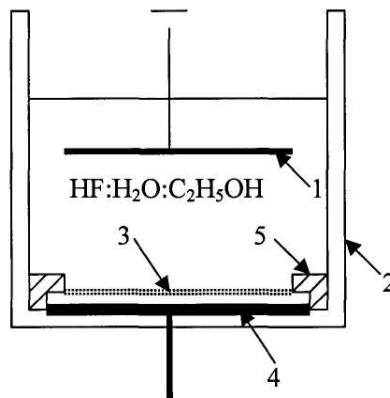
для одержання нанорозмірних багатошарових поруватих структур під час створення дифракційних решіток [26].

Значну кількість досліджень щодо вивчення властивостей ПК здійснюють на використанні традиційних компонентів електроліту $HF:H_2O:C_2H_5OH$ протягом тривалого часу анодування (1 хвил...2 год.). На думку авторів роботи [24], які проводили дослідження деградації ФЛ плівок ПК товщиною 10...20 мкм, одержаного на слаболегованому кремнію в електроліті на основі $HF:HCl:C_2H_5OH$, підвищення сигналу на два порядки вище порівняно з традиційною методикою та наближення форми сигналу фотолюмінесценції до гаусової, пов'язано із створенням оптимальних технологічних параметрів для одержання ПК. Такі умови сприяють створенню структури ПК, яка складається з протяжних орієнтованих нанокристалітів, поверхня яких пасивована тонким шаром діоксиду кремнію, який суттєво зменшує кількість центрів безвиpromінювальної рекомбінації [26].

Мета роботи полягає в дослідженні впливу концентрації фтористоводневої (HF) та соляної (HCl) кислот у електролітах $HF:H_2O:C_2H_5OH$ і $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$ на товщину, поруватість та морфологію шарів ПК, створених на поверхні високо-легованого p^+ кремнію в перші декілька секунд анодування.

Експериментальна частина. Для проведення досліджень було використано пластини монокристалічного кремнію, вирощеного за методом Чохральського, p -типу провідності, леговані бором з питомим опором 0,03 Ом·см, діаметром 75 і товщиною 380 мкм, з кристалографічною орієнтацією поверхні (100). Хімічну обробку пластин здійснювали в перекисно-кислотній ($HCl:H_2O_2:H_2O = 1 : 1 : 5$) та перекисно-аміачній ($NH_4OH:H_2O_2:H_2O = 1:1:5$) сумішах. Потім пластини промивали в деіонізованій воді та сушили в центрифугі. Металеві суцільні покриття на зворотному боці пластин утворювали за допомогою магнетронного напилення алюмінієвої плівки товщиною 1 мкм за тиском $7 \cdot 10^{-5}$ Па на автоматизованому агрегаті безперервної дії «Ораторія 2М» з наступним відпалюванням за температури 550 °С протягом 15 хвилин. Підготування таким чином пластини розрізали на прямокутні зразки площею 3 см² і розміщували в спеціальному тримачу на дні електролітичної ванни, чим забезпечували надійний захист металізації та притискного контакту від електроліту. Електролітичне анодування здійснювали у пристрої, зображеному на рис.1.

В експериментах використовували 40%-ну фтористоводневу кислоту та 96%-ий етиловий спирт. Наявність спирту в складі електроліту сприяє усуненню водню, що утворюється на поверхні ПК. Як катод було використано платиновий дріт діаметром 0,3 мм. Електрохімічне травлення поверхні кремнієвих зразків здійснювали в гальваностатичному режимі в електролітах з різним співвідношенням $HF:H_2O:C_2H_5OH$ і $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$. Густина струму анодування становила 50 мА/см², а тривалість анодування – 8 с.



1 - платиновий дріт; 2 - ванна з фторопласту; 3 - зразок кремнію,
4 - мідна пластина; 5 - ущільнювальне кільце

Рисунок 1 – Схема пристрою для електрохімічного травлення кремнію:

В електроліті $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH$ склад розчину змінювали від 1,0:3,0:1,0:5,0 до 2,0:3,0:0:5,0 об'єм. ч. (для зразків I групи), та від 1,0:3,0:0:6,0 до 1,0:3,0:1,0:5,0 об'єм. ч. (для зразків II групи). В цих розчинах змінювали концентрацію HCl у бік збільшення, а концентрація HF залишалась постійною на рівні 10%.

Структуру поверхні досліджували за допомогою атомно-силового мікроскопу «Nanoscope 3» у «tapping» моді (амплітудному й фазовому режимах). Методика базується на виявленні взаємодії між поверхнею зразка та тонкого вістря з діаметром близько 10 нм, виготовленого з вольфраму. Коли вістря підводили зовсім близько до ділянок поверхні зразка з різними рівнями провідності, відбувалися численні електромагнітні взаємодії, які характеризують морфологію, а саме: вандервальсові сили, електростатичні або магнітні сили, сили тертя та інші. Для проведення вимірювань морфології поверхні зразків поруватого кремнію вістря закріплювали до вільного кінця гнучкої консольної балки, а їх сумісний рух, а також відстань між вістрям та досліджуваною поверхнею, регулювали за допомогою п'єзоелектричних елементів і ланцюга зворотного зв'язку. Через сканування вістря, одержували інформацію про рельєф поверхні. Нелінійність та гістерезис у п'єзоелектричних елементах компенсували відповідними напругами, прикладеними до них. За незначної відстані між вістрям та поверхнею, сили взаємодії між ними сприяють відхиленню консолі та її коливанню, які реєструють за допомогою фотодіоду та лазера. Сила, що прикладена до вістря, є пропорційною відхиленням консолі та її рух, зареєстрований фотодіодом, точно знаходиться у відповідності до неї. Таким чином, завдяки вертикальному та горизонтальному переміщуванням зонду над поверхнею, одержують тривимірне зображення поверхні зразку. Під час досліджень використовували коливання консолі з частотою 200...300 кГц та амплітудою 50...100 нм. Рельєф поруватої поверхні кількісно визначали за допомогою середнього квадратичного значення нерівностей ($H_{скз}$), яке є відхиленням величин x вздовж нормалі до поверхні всередині досліджуваної ділянки:

$$\hat{I}_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}} = \left(\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \right)^{0,5}, \quad (1)$$

де $m \cdot n$ - розмір ділянки у кількості точок; x_{ij} - висота нерівності в точці ij ; $\bar{x}$ - середнє значення величини x всередині ділянки.

Разом з $H_{скз}$ розраховували величину $H_{макс}$, яка становила різницю між двома крайніми значеннями висоти нерівностей всередині ділянки. Ці обидва параметри ($H_{скз}$ та $H_{макс}$) хоча і не свідчать про характерні особливості морфології поверхні, але видають

інформацію про кількісні значення нерівностей. Для вимірювання товщини та поруватості ПК було використано еліпсометричні методики, що викладені в роботі [13].

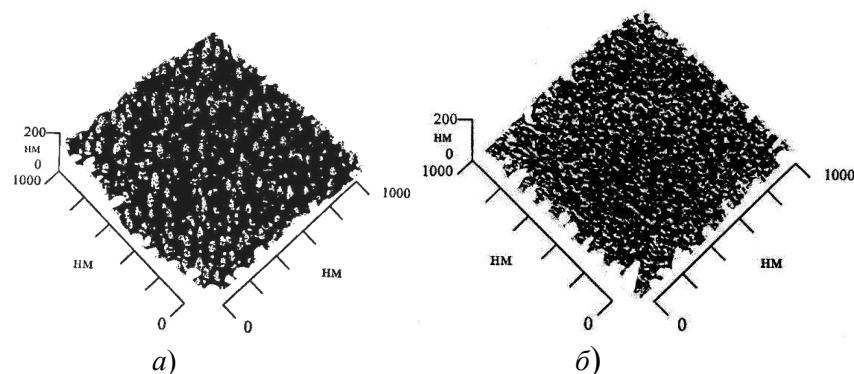
Результати та обговорення. В табл.1 наведено виміряні значення параметрів ПК, які були одержані під час досліджень зразків, що оброблено в розчинах на основі $HF:H_2O:C_2H_5OH$. Для зразків характерно майже постійне зростання товщини (δ) від 9 до 49 нм та поруватості (Π) від 32 до 74%, але поки концентрація HF в електроліті не становила 12%. Далі спостерігали швидке зростання товщини до 108 нм та поруватості до 74%, яке триває доти, поки концентрація HF в електроліті не сягає 14%. Потім зростання товщини ПК уповільнюється та вона майже лінійно зростає до 277 нм, а поруватість зменшується від 74 до 52%.

Таблиця 1 – Результати вимірювання параметрів поруватого кремнію, виготовленого в електроліті $HF:H_2O:C_2H_5OH$

Склад електроліту, (об'єм. ч.)	Π , (%)	δ , (нм)	$H_{скз}$, (нм)	H_{max} , (нм)	Ділянка розчинення кремнію
0,4:2,6:7	32	8	0,11	7,2	Електрополірування
0,6:2,4:7	48	16	0,46	18,51	
0,8:2,2:7	58	23	1,16	23,92	Перехідна
1:2:7	66	32	2,0	35,06	
1,2:2,6,8	69	54	3,6	47,12	Пороутворення
1,4:2,2:6,4	74	108	5,46	64,29	
1,6:2,4:6	70	132	4,16	55,52	
1,8:2,6:5,6	63	155	2,04	37,11	
2:2,8:5,2	58	191	1,17	24,38	
2,2:3:4,8	54	234	0,85	23,22	
2,4:3:4,6	52	277	0,53	22,57	

Відповідно встановлено, що існує зв'язок концентрації HF та морфології поверхні ПК. Якщо для сильнолегованого кремнію процес електрополірування відбувається за значними струмами (50 мА/см^2) та невеликою концентрацією HF (4...6%) і супроводжується рівномірним розчиненням кремнію з майже дзеркальною поверхнею. У такому разі кількість генерованих дірок та таких, що є в наявності на поверхні, перевищує кількість іонів фтору, тому процес травлення є лімітованим дифузією іонів фтору, які пересуваються вздовж електричного поля. На поверхні вони взаємодіють з виступами та згладжують їх. Ділянка електрополірування характеризується мінімальними значеннями нерівностей $H_{скз}$ та H_{max} .

Процес травлення під час збільшення іонів фтору від 8 до 10% супроводжується частковим розчиненням поверхні кремнію, що пов'язано з недостатністю іонів фтору для вступу в реакцію з усіма поверхневими атомами кремнію. Розчинення кремнію, в першу чергу, переважно здійснюється на поверхневих дефектах структури та локальних концентраційних неоднорідностях. На цьому етапі (перехідна ділянка) електрохімічної взаємодії фтористоводневої кислоти та кіремнію здійснюються два конкуруючих процеси, а саме: електрополірування – пороутворення.



а) виготовленого в розчині $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ з 24 % HF ;
б) виготовленого в розчині $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ з 14 % HF

Рисунок 2 – Морфологія поверхні зразка поруватого p^+ кремнію:

Утворювання пор та характерної структури кристалів активується у той момент, коли концентрація HF в електроліті перевищує 12%. Електрохімічна реакція переміщується з боку електрополірування в бік пороутворення поверхні. Поруватість, товщина ПК та висота нерівностей тут швидко зростають. Електрохімічна реакція розчинення кремнію відбувається на стінках кристалів, розмір нерівностей яких сягає максимального значення, а пори збільшуються у діаметрі (рис.2,а).

Під час подальшого збільшення концентрації фтору до 24% в розчині процес розчинення кремнію переміщується із стінок кристалів на ділянки поверхні, де скупчуються дірки. Розчинення кремнію лімітується дифузією дірок, які скупчуються переважно на верхівках кристалів та на дні пор, і саме там відбуваються з найбільшою швидкістю процеси дисоціації, що супроводжуються розчиненням вершин кристалів та зменшенням $H_{\text{скз}}$ від 5,46 до 0,53 нм і H_{max} від 64,29 до 22,57 нм. Товщина ПК зростає від 108 до 277 нм, а структура поверхні, яка зображена на рис.2,б, характеризується квазіоднорідним розподілом пор.

Таблиця 2 – Результати вимірювання поруватості й товщини у зразках поруватого кремнію I групи, виготовлених в розчині $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Склад електроліту, (об'єм.ч.)	П, (%)	δ , (нм)	Ділянка розчинення кремнію
1:3:1:5	75,0	160	Пороутворення
1,1:3:0,9:5	72,0	166	
1,2:3:0,8:5	70,0	172	
1,3:3:0,7:5	67,0	177	
1,4:3:0,6:5	65,0	183	
1,5:3:0,5:5	63,0	186	
1,6:3:0,4:5	62,0	200	
1,7:3:0,3:5	61,5	176	
1,8:3:0,2:5	61,0	155	
1,9:3:0,1:5	60,0	168	
2:3:0:5	59,0	174	

Найбільш вірогідні хімічні взаємодії під час формування ПК, які відбуваються на межі «електроліт–кремній», описуються за допомогою моделі анодної дисоціації кремнію [27].

Таблиця 3 – Результати вимірювання поруватості у зразках поруватого кремнію II групи, виготовлених в розчині $HF:HCl:H_2O:C_2H_5OH$

Склад електроліту, (об'єм. ч.)	П, %	δ , нм	Ділянка розчинення кремнію
1:0:3:6	65	31	Пороутворення
1:0,1:3:5,9	66	31	
1:0,2:3:5,8	68	31	
1:0,3:3:5,7	73	56	
1:0,4:3:5,6	78	84	
1:0,5:3:5,5	77	108	
1:0,6:3:5,4	76	120	
1:0,7:3:5,3	75	129	
1:0,8:3:5,2	74	137	
1:0,9:3:5,1	72	144	
1:1:3:5	71	152	

Зразки I групи виявляють зростання товщини та стійке зменшення поруватості. Їх виготовляли за умов зниження об'ємної концентрації HCl і збільшення кон-центрації HF у рівних долях. Невеличке змінювання товщини та поруватості порівняно із даними табл.1 свідчать, що зменшення концентрації HCl у деякій мірі компенсується збільшенням концентрації HF у електроліті. Зразки II групи були виготовлені в електроліті з постійною концентрацією HF (10 об'ємн.% HF). Збільшення концентрації HCl (див. табл.2) сприяє поступовому зростанню товщини та зменшенню поруватості зразків. Такі дані надають змогу стверджувати про активну роль HCl у процесі пороутворення. За цим ефектом можна спостерігати, якщо дослідити динаміку змінювання товщини у табл.3, де HCl повільно заміщує HF , особливо, якщо ці результати порівняти з даними табл.2. Така ж тенденція у змінюванні рівня поруватості спостерігається на цих же зразках. Змінювання поруватості на зразках II групи (табл.3), особливо, коли концентрація HCl збільшується від 0 до 2 об'ємн.%, менша ніж при відповідних змінювань на зразках у табл.2. В той же час тут можна бачити відносно значне змінювання товщини поруватого кремнію. Проте варіація концентрації HF стає причиною значного змінювання у товщині та поруватості. Таким чином, суміші цих двох кислот можна використовувати для більшої контрольованості процесу пороутворення, ніж у звичайній практиці з використанням стандартного розчину $HF:H_2O:C_2H_5OH$.

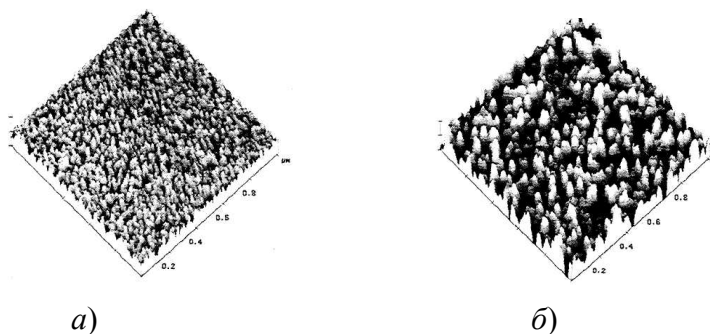
Тепер звернемо увагу на поруватість зразків виготовлених за відповідними складами електроліту: $HF:H_2O:C_2H_5OH = 1,6:2,4:6$ (табл.1) та $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH = 1,2:3:0,8:5$ (табл.2), а також $HF:H_2O:C_2H_5OH = 1,4:2,2:6,4$ (табл.1) та $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH = 1:0,8:3:5,2$ (табл.3). Можна бачити, що поруватість відповідних зразків є практично рівною. Звідки випливає, що поруватість у зразках, які виготовляли у стандартному розчині (табл.1), може бути відтворена електролітом, що містить HCl . Це може бути записано у наступному вигляді:

$$[HF]_{I,II} + 0,5[HCl]_{I,II} \Leftrightarrow [HF]_{std} \quad , \quad (2)$$

де $[HF]_{I,II}$ та $[HCl]_{I,II}$ - концентрації HF та HCl у об'ємних відсотках у розчинах під час виготовлення зразків I та II груп, $[HF]_{std}$ - концентрація HF у об'ємних відсотках під час виготовлення зразків у стандартному розчині. Таким чином, згідно із цим співвідношенням HF може бути замінена подвійною кількістю HCl , для одержання подібного результату у поруватості, як під час використання стандартного розчину.

Інший випадок є під час розглядання впливу HCl на товщину зразків поруватого кремнію. HCl сприяє збільшенню товщини для зразків, поруватість яких описується відповідно із співвідношенням (2). Такий факт вказує на те, що HCl активно реагує не тільки на стінках пор, але й на межі «поруватий кремній - кремній». Вивчення процесу анодного окислення поруватого кремнію у розчинах HCl [24] підтверджує, що оксид утворюється переважно на інтерфейсі ПК/ Si через наявність носіїв заряду в цій області. Утворення оксиду на інтерфейсі навіть під час його травлення фтористоводневою кислотою може бути пояснено конкуруючою роллю HCl у процесі травлення. На рис.2 наведено АСМ зображення морфології поверхні ПК, які було створено за наступними концентраціями: $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH = 1,2:3:0,8:5$ та $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH = 1:3:0,4:5,6$. Можна бачити, що розміри пор і кремнієвих стовпчиків зразків менші за розміром ніж на рис.3. Це свідчить про присутність у складі розчину HCl . Проте кількість HCl у розчині може змінювати не тільки поруватість й товщину, але і розподіл пор за розмірами. Для того, щоб в цьому пересвідчитися треба уважно розглянути рис.3 та рис.2.

Значення нерівностей $\bar{I}_{\text{нec}}$ та $\bar{I}_{\text{iaen}}$ для зразків, зображених на рис.3,а становлять відповідно 3,54 та 32,17 нм. Ці ж значення нерівностей для зразків, зображених на рис.3,б становлять 7,26 та 96,47 нм відповідно.



а) $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH = 1,2:3:0,8:5$. $x = 0,2$ мкм/дел, $z = 20$ нм/дел;
 б) $HF:H_2O:HCl:C_2H_5OH = 1:3:0,4:5,6$. $x = 0,2$ мкм/дел, $z = 20$ нм/дел

Рисунок 3 – АСМ зображення поверхні зразка поруватого кремнію, одержаного в електроліті з складом:

Висновки. В роботі вперше проаналізовано початковий період електрохімічної обробки високолегованого p^+ -кремнію в електроліті із різною концентрацією фтористоводневої кислоти. Результати експериментів показали, що соляна кислота відіграє важливу роль у механізмі утворення поруватого кремнію. Змінювання концентрації фтористоїводневої кислоти у електролітах, які не містять соляної кислоти сприяють варіаціям товщини та поруватості, але співвідношення HCl/HF має більш значний вплив на морфологію поверхні поруватого кремнію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Uhler A. Electrolytic shaping of germanium and silicon // Bell Syst. Techn. Jour. - 1956. - V.35. - P.333-347.
2. Imai K., Unno H. Full isolation by porous oxidized silicon: technology and its application to LSI's // IEEE Transactions on Electron Devices. - 1984. - V. ED-31. - № 3. - P.297-302.
3. Imai K. A new dielectric isolation method using porous silicon // Solid-state electronics. - 1981. - V.-24. - P.159-164.
4. Мельниченко М.М., Свеженцова К.В., Шмирева О.М. Використання субмікронних шарів поруватого кремнію в сонячних елементах // Електроніка и связь. - 2003. - № 20. - С.204-207.

5. Бондаренко В.П., Яковцева В.А., Долгий Л.И. и др. Легированный эрбием окисленный пористый кремний для интегральных оптических волноводов // Письма в ЖТФ. - 1999. - Т. 25. - № 17. - С.69-73.
6. Ашмонтас С., Градаускас И., Загадский В. и др. Детекторы сверхвысокочастотного электромагнитного излучения из пористого кремния // Письма в ЖТФ. - 2006. - Т.32. - №14. - С.8-14.
7. Bratkowski A., Korcala A., Lukasiak Z. etc. Novel gas sensor based on porous silicon measured by photovoltage, photoluminescence and admittance spectroscopy // Opto-Electronics review. - 2005. - V.13. - № 1. - P.35-38.
8. Canham T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. - 1990. - V.57. - № 10. - P.1046-1048.
9. Венгер Е.Ф., Каганович Э.Б., Кириллова С.И. и др. Исследование структур пористый кремний - кремний методом температурных зависимостей фотоэдс // Физика и техника полупроводников. - 1999. - Т.33. - Вып.11. - С.1330-1333.
10. Хрипко С.Л., Жолудев Г.К. Поляризація люмінесценції в поруватому кремнії // Нові технології (Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління). - 2007. - № 3 (17). - С.17-23.
11. Зимин С.П. Классификация электрических свойств пористого кремния // Физика и техника полупроводников. - 2000. - Т.34. - Вып.3. - С.359-363.
12. Makara V.A., Odarych V.A., Vakulenko O.V. etc. Effect of boron diffusion of silicon on the micromechanical and luminescence properties of porous layers // Thin solid films. - 1998. - V.312. - № 1-2. - P.202-206.
13. Makara V.A., Odarych V.A., Vakulenko O.V., Dacenco O.I. Ellipsometric studies of porous silicon // Thin solid films. - 1999. - V.342. - № 1-2. - P.230-237.
14. Биленко Д.И., Абаньшин Н.П., Галашикова Ю.Н. и др. /Электрофизические и оптические свойства пористого кремния // Физика и техника полупроводников. - 1983. - Т.17. - Вып.11. - С.2090-2092.
15. Бондаренко В.П., Дорофеев А.М., Табулина Л.В. Влияние режимов анодной обработки и высокотемпературного отжига на удельную поверхность пористого кремния // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1985. - № 10. - С.64-69.
16. Хрипко С.А. Роль света в процессах формирования пористого кремния на подложках p- типа // Физика и техника полупроводников. - 1993. - Т.27. - Вып.11/12. - С.1961-1964.
17. Unagami T. Formation mechanism of porous silicon layer by anodization in HF solution // Journal of the electrochemical society. - 1980. - V.127. - № 2. - P.476-483.
18. Николаев К.Н., Немировский Л.Н. Особенности получения и области применения пористого кремния в электронной технике / Обзоры по электронной технике. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1989. - № 9. - 59 с.
19. Smith R.L., Collins S.D. Porous silicon formation mechanisms // Journ. Appl. Phys. - 1992. - V.71. - № 8. - P.R1-R22.
20. Billat S., Thonissen M., Arens-Fisher R. etc. Influence of etch stop on the microstructure of porous silicon // Thin solid films. - 1997. - V.297. - № 1-2. - P.22-25.
21. Тутов Е.А., Павленко М.Н., Тутов Е.Е. и др. Равновесные и неравновесные электродные процессы на пористом кремнии // Письма в ЖТФ. - 2006. - Т.32. - № 13. - С.6-11.
22. Хрипко С.Л. Исследование структуры слоев пористого кремния методом просвечивающей микроскопии // Вісник Запорізького державного університету: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. - Запоріжжя, 1999. - № 1. - С.154-157.
23. Костишко Б.М., Апполонов С.В., Саломатин С.Я. и др. Особенности окисления пористого кремния при водном дотравливании // Письма в ЖТФ. - 2006. - Т.30. - № 7. - С.1-6.
24. Белогорохов А.И., Белогорохова Л.И. Оптические свойства слоев пористого кремния, полученных с использованием электролита HF:HCl:C₂H₅OH // Физика и техника полупроводников. - 1999. - Т.33. - Вып. 2. - С.199-203.

25. *Monastyrskii L., Lesiv T., Olenich I.* Composition and properties of thin solid films on porous silicon surface // *Thin Solid Films.* - 1999. - V.343-344. - P.335-337.
26. *Kordas K., Beke S., Pap A. etc.* Optical properties of porous silicon. Part II. Fabrication and investigation of multilayer structures // *Optical Materials.* - 2003. - V.25. - P.257-260.
27. *Lehmann V., Gosele U.* Porous silicon formation: A quantum wire effect // *Appl. Phys. Lett.* 1991. - V.58. - № 8. - P.856-858.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2008 р.

Рецензент, проф. Т.В.Критська