

УДК 621.315.592

**В.Ю. Єрохов, А.О. Милянч, Ю.М. Богдановський**  
Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра напівпровідникової електроніки

## **РОЗРОБКА РЕНТАБЕЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ФРОНТАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

© Єрохов В.Ю., Милянч А.О., Богдановський Ю.М., 2001

**V.Yu. Yerokhov, A.O. Mylyanych, Yu.M. Bogdanovskij**

## **THE COST-EFFECTIVE PROCESS DEVELOPMENT OF FRONTAL SURFACE FORMING FOR SILICON SOLAR CELLS**

© Yerokhov V.Yu., Mylyanych A.O., Bogdanovskij Yu.M., 2001

**Наведені результати досліджень з вивчення рентабельних процесів створення структур кремнієвих сонячних елементів, хімічного росту макропористого кремнію для фронтальної антивідбиваючої поверхні фотоперетворювача. З'ясовується значення різних домішок у хімічних розчинах для росту поверхневої текстури.**

**The paper presents the investigation results on profitable process of silicon solar cells formation, macro porous silicon chemical growing for frontal antireflective surface of photoconverter. The role of different additions in chemical solutions for surface texture growing was investigated.**

**Вступ.** Результатом інтенсивного розвитку сонячної енергетики за два останні десятиліття стало широке впровадження фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) – сонячних елементів (СЕ) для живлення різноманітних малопотужних електронних приладів. Однак у зв'язку із виснаженням запасів енергетичної сировини на Землі та безперервним зростанням потреб людства в дешевій електричній енергії, постає питання про розвиток високопотужної сонячної енергетики, яка змогла б скласти конкуренцію традиційним методам генерації електрики. Вимогами до таких ФЕП є передусім такі критерії:

- технологічна простота і низька вартість одержання;
- висока ефективність роботи;
- достатня деградаційна стійкість.

Всі наведені вище фактори можна реалізувати тільки при використанні новітніх технологій створення сонячних елементів. Одним з шляхів підвищення ефективності роботи та деградаційної стійкості, а також зменшення вартості може бути використання в структурі сонячного елемента шарів пористого кремнію.

Пористий кремній (por-Si), що отримується електрохімічним або хімічним травленням монокристалічного кремнію в електролітах на основі плавикової кислоти, останнім часом все більше привертає увагу фахівців з фотовольтаїки, завдяки своїм унікальним властивостям. Однак до теперішнього часу прийнятні результати отримані тільки при використанні por-Si антивідбивним покриттям для кремнієвих сонячних елементів (СЕ) [1, 2].

Пористий кремній виявлено більше ніж 40 років тому під час дослідження методів полірування поверхні Si [3]. Пористим кремнієм є плівка, яка утворюється на поверхні кремнію після проведення анодування чи хімічного травлення в електролітах на основі

HF. Типово такі плівки є завтовшки від 0,1 до 100 мкм і складаються з кремнієвих кристалітів нанометричного розміру, оточених порожнечою, з ступенем пористості до 90 %. Подальше вивчення властивостей цього матеріалу проводилось екстенсивним шляхом [4, 5, 6], і було досліджено такі важливі характеристики, як пористість, морфологія структури, провідність, а також показники поглинання та заломлення світла залежно від технологічних параметрів росту плівок.

Завдяки низці своїх унікальних властивостей, por-Si може стати одним з найбільш перспективних матеріалів для оптоелектронних приладів, що використовують фотовольтаїчний ефект. І тільки недостатня кількість експериментального матеріалу, а також не зовсім успішні перші спроби використання por-Si в структурах сонячних елементів стали тимчасовою перешкодою на шляху обширних дослідницьких робіт у цій галузі. Проте, кількість робіт з фотовольтаїчного використання por-Si постійно зростає і це наочно свідчить про те, що цей матеріал потрібно розглядати як новий матеріал кремнієвої фотовольтаїки.

Наприкінці останнього десятиліття визначено головну проблему сучасної фотовольтаїки – це вартість окремо зробленого сонячного елемента (батареї, панелі) і системи, збудованої на них. Базуючись на цьому, мета цієї роботи – показати один з шляхів здешевлення вартості кінцевого продукту, розробка рентабельних технологічних процесів отримання високоефективних фотоперетворювачів сонячного світла, використовуючи процеси хімічного росту пористого кремнію для фронтальних багатопланових антивідбиваючих покриттів для СЕ.

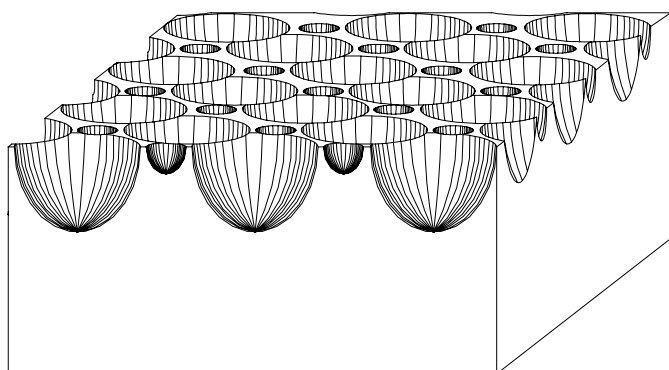


Рис. 1. Ідеальна модель поверхні кремнієвої підкладки з напівеліпсоїдальними комірками

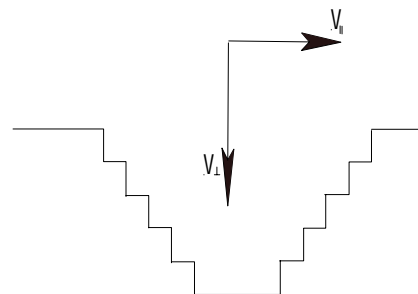


Рис. 2. Виникнення елементарної комірки

**Модель поверхні кремнієвої підкладки та хімічні умови її формування.** Саморозчинення кристалічного Si в розчинах кислот є об'єктом досліджень вже упродовж кількох останніх десятиліть, однак, про механізм процесів хімічного розчинення кристалів, взагалі, і утворення дірок травлення, зокрема, поки що немає одного єдиного погляду. Не винятком є і процеси взаємодії кремнію з розчинами концентрованої плавикової і нітратної кислот. В основному, сучасні уявлення про цю взаємодію базуються на роботах Тарнера [5], який розглядав процеси розчинення кремнію з електрохімічного погляду. Лімітуючою стадією процесів розчинення на його думку була швидкість доставки компонентів розчину до катодних ділянок, які утворюються на поверхні напівпровідника. Однак такі уявлення є дуже спрощеними і не враховують цілу низку факторів, а саме:

– існування блукаючих струмів у кристалі (на це має вплив температура, вміст домішок в кристалі тощо);

– іони на поверхні напівпровідника розглядають як безструктурні точкові носії заряду, при цьому участь конкретних атомних орбіталей в утворенні зв'язків між напівпровідником і реагентами не враховують, а основна увага приділяється лише колективним властивостям твердого тіла, положення в ньому рівня Фермі і вплив його зміни на переважання діркового чи електронного типів в розподілі між компонентами;

– не враховано, що найчастіше поверхня кристалічного тіла характеризується не кристалічною, а аморфною структурою;

– нехтується факт електростатичної взаємодії між іонами в самому розчині;

– не розглядаються адсорбція і десорбція компонентів розчину на поверхні кристала тощо.

Вивчення процесів взаємодії кристалічного кремнію з розчинами кислот ( $\text{HF}$  і  $\text{HNO}_3$ ) є необхідним для правильного розуміння процесів формування поверхні кристалічної підкладки, яка за рахунок своїх геометричних особливостей характеризується новими важливими функціональними властивостями. Такими, зокрема, як малий коефіцієнт відбивання, створення на поверхні оптичної системи захоплення світлового потоку та наявності геометричного рельєфу, який легко піддається подальшим технологічним обробкам (створенню р/п переходу, пасивації).

Умовою перерахованих вище переваг є наявність на поверхні матеріалу напівеліпсоїдальних комірок травлення з різкоокресленими гранями (рис. 1). Основною причиною формування такої поверхні є співвідношення швидкостей хімічної взаємодії (розчинення) в напрямках, перпендикулярних і паралельних до поверхні  $V_I/V_{II}$ , коли  $V_I \gg V_{II}$  (рис. 2). На форму і розміри комірок травлення, при використанні полірованої поверхні кремнієвої підкладки, вирішальний вплив має природа (хім. склад) розчинника (розчину реагентів), оскільки швидкість, в напрямку, перпендикулярному до поверхні  $V_I$ , залежить від міжфазної енергії, а в напрямку, паралельному до поверхні  $V_{II}$ , може понижуватись відповідними інгібіторами. Отже, відомості про швидкість процесів травлення (розчинення), які залежать як від властивостей твердої фази (Si), так і від особливостей самого розчину, мають неабияке прикладне і теоретичне значення.

**Експеримент.** Для досліджень готували розчини кислот, які містять хімічно чисті  $\text{HF}$  (конц. 40 %) і  $\text{HNO}_3$  (конц. 68 %) у об'ємному співвідношенні 2:1, яке, згідно з [5], характеризується високою швидкістю травлення кристалічного кремнію. Експерименти проводили у фторопластових реакторах циліндричної форми, які заповнювали однаковими об'ємами розчину травника. Хімічна взаємодія відбувалась на поверхні зразка площею  $15 \text{ мм}^2$ . Швидкість розчинення  $V$  ( $V = V_I + V_{II}$ ) визначали за втратою маси зразків (виміряною з точністю  $\pm 0,00005 \text{ г}$ ) протягом різного часу травлення. Експериментальні результати показано на рис. 3.

Дослідження показали, що розчини кислот без будь-яких додатків є недостатньо ефективними для формування геометричної форми поверхні з малим коефіцієнтом відбивання. Оскільки, по-перше, не дозволяють досягнути необхідного розміру комірок травлення, а по-друге, за рахунок великих значень швидкості травлення (рис. 3, крива 1), призводять до великої втрати маси зразка, що спричиняє неекономну витрату матеріалів, і, як наслідок, погіршується якість (мала товщина та погана морфологія поверхні) отриманих підкладок.

Для запобігання великої втрати маси, а отже, зниження швидкості травлення  $V_{II}$ , було проведено низку дослідів для пошуку найпридатніших в цьому технологічному процесі інгібіторів. Встановлено, що додавання незначної кількості натрієвої солі нітридної кислоти

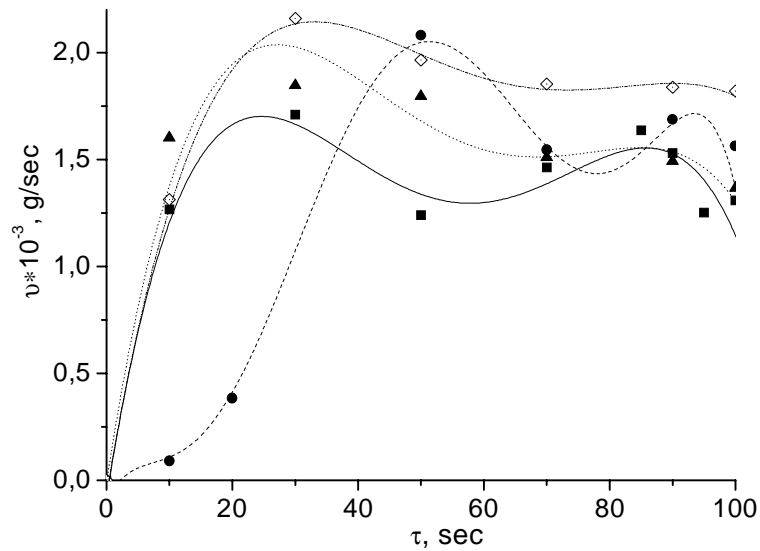


Рис. 3. Кінетика травлення кристалічного кремнію в дослідних розчинах:  
 ◇ – вихідний розчин, ● – розчин з додатками інгібітора,  
 ▲, ■ – розчин з додатками інгібітора та поверхневого активатора

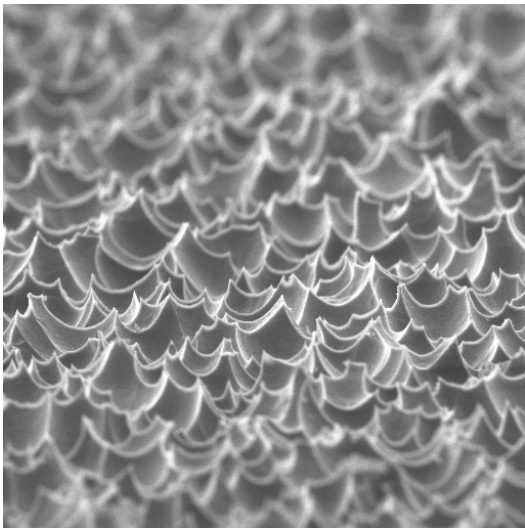


Рис.4. Морфологія поверхні кремнієвої текстури, отриманої методом хімічного травлення

призводить до суттєвого сповільнення процесів хімічної взаємодії в перші 30 с (рис. 3, крива 2), а потім до стрімкого збільшення швидкості травлення. Однак цей процес є також недостатньо ефективним за рахунок малої глибини (до 10 мкм) отриманих комірок, яку можна збільшити за рахунок додавання в розчин поверхневого активатора. Додавання поверхневого активатора призводить до зниження міжфазної енергії та покращання дифузії компонентів до поверхні розподілу фаз. Такими речовинами, які покращують поверхневу активність за рахунок зниження поверхневого натягу розчину на границі розподілу фаз, можуть виступати органічні речовини, які містять полярну групу та неполярний вуглеводневий радикал.

У досліді було використано низку органічних додатків, які характеризуються різними співвідношеннями швидкостей травлення (рис. 3, крива 4,

3) та отримано поверхні з різними геометричними розмірами елементарних комірок, від 10 до 40 мкм. Оптимальною з погляду практичного отримання та використання (склад травника, тривалість обробки, подальші технологічні операції з формування розвиненого р/п переходу тощо.) можна вважати пористу поверхню кремнієвої пластини з розміром елементарної напівеліпсоїдальної (кратероподібної) комірки близько 25 мкм. (рис. 4).

**Обговорення результатів.** В основу технологічного процесу було покладено технологію ізотропного хімічного травлення кремнієвих поверхонь, а також технологію хімічного одержання пористої кремнію. Під час роботи вдалося експериментально визначити оптимальні умови отримання нової макропористої (кратероподібної) текстури поверхні крем-

нієвих підкладок (рис. 4). Такими умовами можна вважати використання розчину кислот в об'ємному співвідношенні 2:1 з додатками незначних кількостей інгібітора та поверхневого активатора. При цьому час хімічної обробки становить 60 – 90 с. Сформована хімічними методами обробки поверхня кремнієвої підкладки SE, порівняно з планарною поверхнею SE, дозволяє досягнути кількох суттєвих переваг, а саме: характеризується насамперед низьким коефіцієнтом відбивання (до ~15 – 20 %), наявністю геометричного рельєфу, який легко піддається подальшим технологічним обробкам (створенню р/п переходу, пасивації) [7], а також можливістю створення на поверхні оптичної системи захоплення світлового потоку, що при неперпендикулярному входженні світлового променя у SE дозволяє йому краще поглинатись.

1. Menna, P., Di Francia, G. and La Ferrara // *V. Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*. 1995. 37. P. 13 – 24. 2. Kazmerski L.L. // *Photovoltaic: review of cell and module technologie. Renewable & Sustainable Energy Review*. 1997. 1 – 2. P. 61. 3. Uhlir A. // *Bell System Tech. J.* 1956. 35. P. 333. 4. Archer R. J. // *J. Phys. Chem. Solids*. 1960. 14. P. 104. 5. Turner D. R. // *J. Electrochem. Soc.* 1960. 107. P. 810. 6. Schwartz B. and Robbins H. // *J. Electrochem. Soc.* 1976. P. 1903 – 1909. 7. Yerokhov V., Melnyk I. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1999. 3. P. 291 – 323.

УДК 621.375.029.64

А.Й. Семенюк, Л.Д. Юрченко, М.М. Грозь, Л.М. Смеркло  
Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

## ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

© Семенюк А.Й., Юрченко Л.Д., Грозь М.М., Смеркло Л.М., 2001

A. Semenyuk, L. Yurchenko, M. Groz, L. Smerklo

## THE TEMPERATURE STABILIZATION OF PULSE TRANZISTOR VHF POWER AMPLIFIER

© Semenyuk A., Yurchenko L., Groz M., Smerklo L., 2001

**Розглянуто особливості розробки потужних імпульсних НВЧ транзисторних підсилювачів у широкому діапазоні температур. Вибрано принцип термостабілізації і запропоновано схему термостабілізації імпульсного потужного НВЧ підсилювача потужності. Наведено результати експериментальних досліджень.**

**The details of the development of the microwave power pulse transistor amplifiers have been considered with regard to a wide temperature range. The principle of heat setting has been defined. The heat setting circuit of the power amplifier has been designed. The results of the experimental investigation have been presented.**

**Вступ.** Проектування транзисторних схем завжди зазнає проблеми компенсації залежності параметрів транзисторів від температури, що необхідно для забезпечення стійкості і