

УДК 632.38

В даній статті показані шляхи удосконалення технології формування полікремнію, який є основою для виробництва сонячного і електронного монокремнію

Ключові слова: полікремній, монокремній, PV – індустрія

В данной статье показаны пути усовершенствования технологии формирования поликремния, который является основой для производства солнечного и электронного монокремния

Ключевые слова: поликремний, монокремний, PV – индустрия

This article shows ways to improve the technology of polysilicon, which is the basis for the production of solar and electronic mono silicon

Key words: polysilicon, mono silicon, PV – industry

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОСАДЖЕННЯ ПОЛІКРЕМНІЮ, ЯК ОСНОВИ СОНЯЧНОГО І ЕЛЕКТРОННОГО МОНОКРЕМНІЮ

С.П. Новосядлий

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
Кафедра радіофізики та електроніки*
Контактний тел.: (0342) 71-48-48
E-mail: nsp@pu.if.ua

В.В. Кропивич

Аспірант*

*Прикарпатський національний університет ім. Василя
Стефаника
вул. Галицька, 201, м. Івано-Франківськ, Україна, 76008
Контактний тел.: 096-652-90-51
E-mail: kropik1@rambler.ru

1. Вступ

Сьогодні, світове виробництво полікремнію високої чистоти обмежене 31 тис. тон в 2005 році. Біля 19,2 тис. тон поставляється в напівпровідникову індустрію та 16,3 тис. тон в PV-індустрію. Прогноз на 2010 рік показує: попит на кремній в PV-індустрії з 16 тис. тон в 2005 році до 47 тис. тон в 2010 році (при темпах росту 30%).

Попит на кремній сонячної якості (SoG-Si) росте досить швидко, так як в наступні десять років, темпи росту світової сонячної індустрії (PV-індустрії) оцінюється за прогнозом на рівні 30% в рік. Це вимагає, відповідно, стратегії на виробництво вихідного матеріалу, а саме полікристалічного кремнію.

Відповідно цей ріст може бути забезпечений тільки сьогоднішніми виробниками, які виготовляють полікремній. Головна мета на ці роки полягає в нарощуванні об'ємів виробництва також модернізації технології осадження полікристалічного кремнію.

2. Кремній і його коротка технічна характеристика

Кремній (Si) – хімічний елемент IV групи періодичної системи елементів Менделєєва; атомний номер

14, атомна маса 28,086. Вміст кремнію в земній корі складає 27,6% ваг., і поступається тільки кисню. У вільному вигляді даний елемент не зустрічається і знаходиться переважно у зв'язаному вигляді диоксиду кремнію SiO_2 та силікатів: польовий шпат $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$; смола $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; азбест $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; каолінт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Кристалічний моно кремній – це темно-сіре металеве тіло, має кубічну гранецентровану кристалічну ґратку типу алмазу. Густина кремнію-2,33 г/см³, температура плавлення-1417°C, кипіння-2000°C, теплопровідність-0,20÷0,30 кал/(см·с·град), питома теплоємність при (20-100°C) - 0,191 кал/(г·град), межа текучості при стисненні-9,47 мг/мм². Пластична деформація починається при температурі більше 800°C.

Кремній, що не містить домішок, з ідеально правильною кристалічною структурою, при абсолютному нулі повинен бути ізолятором. При температурі відмінній від абсолютного нуля виникає вже власна провідність, причому носіями електричного струму є не тільки вільні електрони, але й дірки, які утворюються в валентній зоні.

Деякі структури також впливають на електропровідність, викликаючи діркову провідність. Вважають на сьогодні, що для чистого монокремнію

при кімнатній температурі питомий опір складає 106 Ом·см.

Технологічна ланка виробництва напівпровідникового кремнію: кварцит - металургійний кремній-полікристалічний кремній-монокристалічний кремній-кремнієві пластини (підкладки).

Основні області застосування: сонячна енергетика (фотоелектричні перетворювачі) і мікроелектроніка.

Кремній технічної чистоти (95-98%) отримують в електричних печах відновленням, що знаходиться в надлишку кремнезема (SiO_2), коксом між графітовими електродами.

Сьогодні дуже важливий питанням є вибір чи розробка нових методів вирощування полікристалічного кремнію з мінімальними матеріальними та енерговитратами.

3. Динаміка монокремнію, кремнієвих пластин та матеріальних ресурсів

Особливістю глобального ринку високочистого кремнію є те, що можливість виробництва мають декілька країн світу, а технології на його виробництво є закритими, технологічна ланка випуску високочистого кремнію: кварцит-полі кремній-монокремній-кремнієві пластини-структури ВІС чи сонячні модулі вимагають досить складного обладнання, так як в природі полікремній та монокремній не існує, а його виробництво проводиться на стерильному обладнанні.

Так, повні ланки виготовлення високочистого кремнію є на сьогодні в США, Японії, Німеччині, Італії.

Причому всього лише шість корпорацій вертикально інтегрованих холдингів-контролюють міжнародний ринок високочистого кремнію. Це німецька фірма Wacker Siltronic, італійська MEMS, японська Toshiba Ceramics і Mitsubishi Materials Silicon, американська Komatsu Elektronik Metals і Shin-Etsu Semiconductors.

В будь-якому випадку створення нового виробництва полі Si займе 2-3 роки, а вартість прокату оцінюється в 100-150 млн. доларів, при ціні за 1 кг полікремнію 80-120 доларів.

Окупність виробництва полікремнію потужністю 2-3 тони в рік складе 1,5-2 роки при досить високій рентабельності виробництва.

Поступово дорожчає в 2003-2006рр., і монокремній сонячної енергетики, ціна якого досягла 300-350 доларів за кілограм.

Ціна на монокремній електронний знаходиться на рівні 350-500 доларів за кілограм. Причина росту цін – ріст споживання монокремнію PV-індустрією, яка в 2004 році виросла на 55%, а в 2006 році на 62%, що складає 10 тис., тон в рік, а прогноз росту на 2010 рік складає вже 70%.

Потреба світового ринку на монокремній електронної якості перевищує 150 тис. тон, тому сьогодні рівень завантаження профільних потужностей на підприємствах світу в умовах такого дефіциту складають біля 100%.

Це наглядно видно з табл. 1.

Таблиця 1

Потужності виробництва полікремнію і його випуски світовими фірмами в 2005 році (тис. тон)

№	Виробник	Полі-кремній електронної якості	Полі-кремній сонячної якості	Об'єм потужностей	Завантаження
1	Hemlock-Semiconductor Corp	5,2	2,2	7,4	100%
2	Tokujama	3,8	1,4	5,2	100%
3	Wacker Chemi GmbH	3,2	1,8	5,0	100%
4	MEMS Electronic Materials	3,0	0,7	3,7	100%
5	Advanced Silicon Materials	2,8	0,2	3,0	100%
6	Mitsubishi Materials	1,4	0,2	1,6	100%
7	Mitsubishi Polycrystalline	1,1	0,1	1,2	100%
8	Sumitomo Titanium	0,7	0	0,7	100%
9	Solar Grade Silicon LLC	0	2,3	2,3	100%
10	Інші виробники	0	6	6	100%
–	Всього	21,2	14,9	63,1	–

Кремнієві пластини (КП) також представляють собою високий сегмент світового ринку високочистого кремнію. Проте темпи росту збуту кремнієвих пластин в останні роки дещо знижувались. Так, якщо в 2002 році продано 4,68 млрд. дюймів² (1 кв. дюйм=6,25 см²), що сягало попереднього року 19%, а вже в 2003 році збільшення реалізації кремнієвих пластин сягало лише 10%. В 2004 році приріст знову прискорився до 22% (6,3 млрд. дюймів²). На 2006 рік продаж сягав також 6,637 млрд. дюймів². Завантаження потужностей по виробництву восьми дюймових (200мм) кремнієвих пластин досягло 95%, при цьому зростає потреба в діаметрі 250 та 300 мм.

Із збільшенням діаметру кремнієвих пластин, затрати на їх виробництво суттєво збільшилися. Так, перехід від виробництва кремнієвих пластин від діаметра 150мм до 200мм., привів до подорожання кремнієвих пластин на 30%. А перехід на кремнієві пластини 300мм., принесе мікроелектроніці дохід, збільшений на 25%. Тобто, треба шукати високоефективну технологію його виготовлення.

Для виробництва моно і полікремнію використовують технічний кремній – між певними стадіями його обробки. Даний сировинний продукт потрібний для хімічної промисловості, алюмінієвого виробництва, а також для виготовлення трихлорсилану (ТКС) з метою одержання високочистого кремнію. Сьогодні ведучими світовими виробниками технічного кремнію є фірми країн: Китаю, Бразилії, Норвегії, Франції, Росії, Південно-Африканської Республіки. Вони ви-

пускають більше 80% технічного кремнію. Кожний рік світове виробництво технічного кремнію (ТК) збільшується на 20-22%. Головна проблема виготовлення ТК полягає в його енергозатратності. Україна має найбільш якісні поклади кварцитів в світі (Житомирська та Закарпатська обл.). Виробництво технічного кремнію в Україні зосереджено на ВАТ «Запорізький атомні квант комбінат» та «Запорізький титаномагнієвий комбінат».

4. Електронний полікремній і технологія його формування

Електронний полікремній представляє собою полікристалічний матеріал високого рівня чистоти і є основою для виробництва монокремнію.

Електронний кремній – це один із найбільш чистих видів, із основними домішками, які представляють інтерес є бор, вуглець, фосфор, миш'як, сурма.

Легуючі елементи в чистому кремнії не повинні перевищувати рівня 10^{-7} ат %, а вуглець – $2 \cdot 10^{-7}$ ат %. Відповідні вимірювання виконують на тестових зливках, а не на полікристалічному матеріалі. Більшість сучасних лабораторних методів не дозволяють визначити вміст легуючих елементів з рівнем нижче 10^{-7} ат %, тому значення рівня легування отримують виходячи з вимірювань питомого опору тестового зливка.

Як було сказано вище, отримання електронного кремнію здійснюють в декілька етапів. Спочатку в дуговій електропечі із занурюючим електродом отримують металургійний кремній. Така електропіч завантажується кварцитом (форма чистого SiO_2) та вуглицем у вигляді вугілля, коксу і деревних стружок.

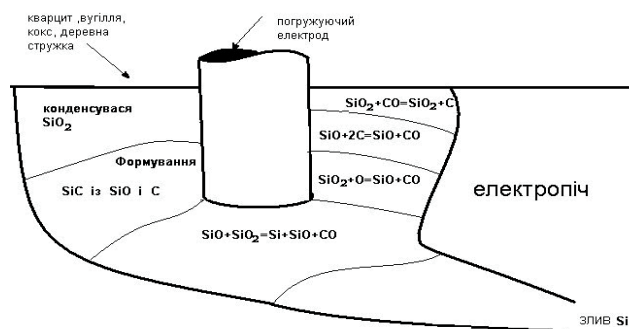
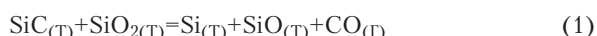


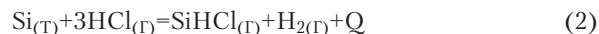
Рис. 1. Схема отримання металургійного кремнію із кварциту

В печі проходить ряд реакцій, які можна записати у вигляді результуючого рівняння:



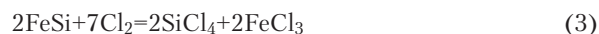
де індекс (т) - тверда, а (г) - газоподібна фази. Процес плавлення є сильно енергоємним і споживає 13 кВт·год/кг металургійного кремнію із ступінню чистоти 98 %.

На цьому етапі вміст домішок: Al, B, Cu, Au, Fe, P, Cr, Co, Mn, Sb, Ni, As, Ti, La, Mo, C, W, O₂, Na. На наступному етапі кремній мелють в порошок. Вступаючи в реакцію з безводним хлористим воднем (HCl), кремній переводять в трихлорсилан (SiHCl_3 -TCS):



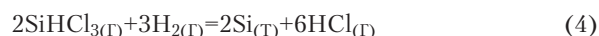
Дана реакція проходить в гідрометалургійній установці при температурі 300°C із застосуванням відповідних каталізаторів. Одночасно утворюється тетрахлоридкремнію та інші хлориди домішок. На цьому етапі і проводиться процес очистки (ректифікації) кремнію. Трихлорсилан, як і інші хлориди домішок, представляють собою рідину (з температурою кипіння 32°C). Тому тут і використовують очистку шляхом фракційної дистиляції.

Така схема отримання трихлорсилану дуже енергоємна і використовують схему отримання чотирихлористого кремнію SiCl_4 (тетрахлориду Si – STS) із FeSi згідно реакції:



Остання реакція використовується для промислового отримання аеросилу (SiO_2).

Електронний кремній отримують із очищеного трихлорсилану (STS) шляхом осадження його із парогазової суміші (ПГС) аналогічно процесу епітаксійного вирощування із парогазової суміші. Хімічна реакція представляє собою реакцію відновлення кремнію із трихлорсилану:



Така реакція проводиться в реакторі стерильної установки осадження із ПГС (рис. 2). Резистивно нагрітий кремнієвий стержень (нагрівач) служить центром зарядження для полікремнію. Повний цикл осадження тривалий в залежності від виходу.

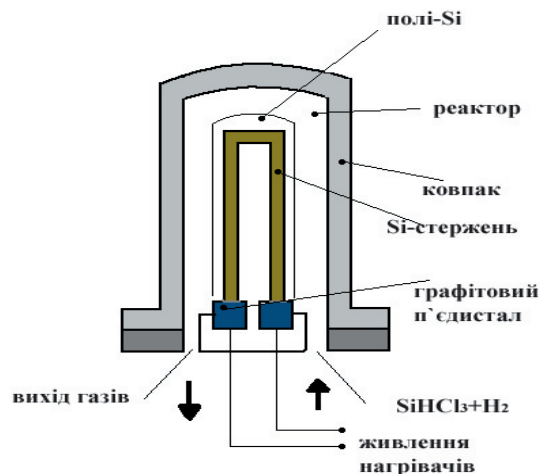


Рис. 2. Схема отримання полі-Si методом осадження із ПГС

5. Аналіз методів отримання полікристалічного кремнію та вибір оптимальної технології його формування

Розглянемо спочатку сонячний кремній та перейдемо до кремнію для напівпровідникової індустрії.

На другій конференції по сонячному кремнію в Мюнхені в квітні 2005 року всі виробники кремнію

для PV – індустрії виразили свою тривогу в проблемах майбутніх поставок, PV – індустрія, вже в 2005р., прогнозувала великий дефіцит в сировинному кремнії і, як результат, ріст цін на кремній до рівня 40- 50 EURO/кг. Виробник кремнієвих пластин вимушені були відкласти реалізацію своїх планів розширення виробництва і переходу на діаметр 300мм.

Це приведе до зниження темпів росту PV – індустрії. Кремній для напівпровідникової індустрії повинен пройти через великий енергозатратний процес, для того, щоб досягти необхідної напівпровідникової чистоти ($10^{-7}\text{ат\%}$). Його ціна в 30-40 разів більша, ніж металургійного кремнію (MGS) і вдвоє більша, ніж сонячний кремній. Тому подальше дослідження проводиться нових варіантів процесу отримання сировини для сонячних елементів. В принципі є декілька шляхів виробництва кремнію для PV – індустрії. Ці шляхи подані на рис. 3.

На сьогодні, відходи електронної промисловості (скрап), як бракований матеріал від напівпровідникової індустрії-є головним джерелом поставки Si для PV – індустрії. Декілька компаній (Wacker, ASIMI та інші) приймають значні зусилля по економічному використанню хімічного варіанту, шляхом переходу від розгляду TCS на стержнях до квазіістисненого шару, на останній стадії полі Si.

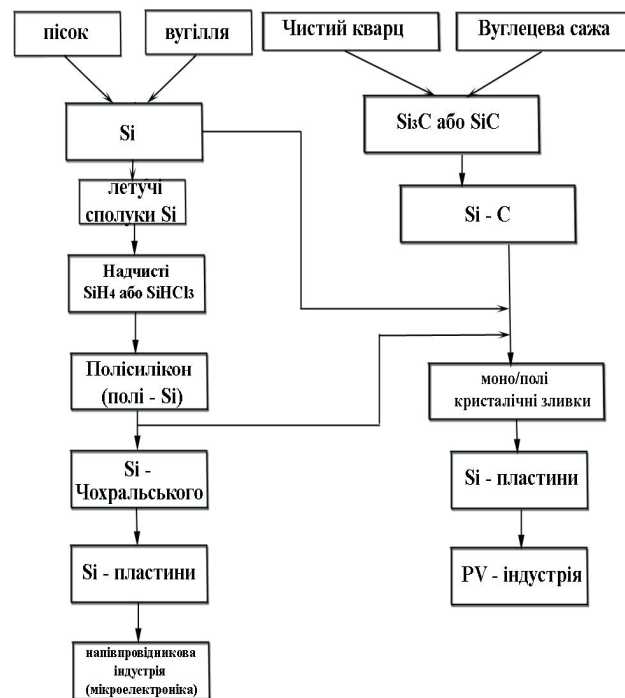
Очистка металургійного Si не привела поки що до життєздатного процесу отримання сировини для сонячної індустрії. Декілька компаній (Elkem, FerroAtlatica) працюють над цим варіантом виготовлення сонячного кремнію. Останнє потенційне джерело кремнію сонячної якості може з'явитись окремо на відміну від кремнію карботермічного плавлення кварцу і вуглецю (рис. 3б) і подається як окремий маршрут Solsilc.

Розглянемо коротко хімічні методи отримання кремнію електронної якості. В хімічному маршруті, кремній металургійної якості (МЯ) вступає в реакцію з хлористим воднем HCl і перетворюється в газоподібну фазу. Газова фаза дистильється і побічні продукти реакції відділяються, після чого газ (часто TCS) піддається розпаду на кремнієвих стержнях в CVD-реакторі. Тому є загальноприйнятим – що підприємства, які відпускають кремній електронної якості, виготовляють кремній через дистильовані гази-хлорсилани. Для створення нових, відносно невеликих виробничих потужностей таким завідомо необхідні не малі інвестиції і вони є сильно енергозатратними.

Декілька компаній (Hemlock, Wacker, Silar Silicon LLC, Tokujama Joint Solar Silicon) - всі мають перспективні плани розширення виробництв, які базуються на хлорсиланах тільки в реакторах нового типу-реакторах квазіістисненого шару, які сьогодні розглядаються як пілотні проекти.

Розглянемо тепер металургійний метод отримання кремнію високої якості (метод Solsilc) маршрут якого поданий на рис. 3б. В прямому металургійному способі кремній виготовляють із сировинних матеріалів ультрависокої чистоти. Згідно інформації Solsilc Technology [6], цей метод отримання кремнію забезпечує виробництво кремнію дуже високої чистоти і його технологія вже апробована в експериментальному масштабі 50-100тон/рік. Даний карботермічний метод виробництва Si може знизити вартість сировинного кремнію для PV-індустрії до рівня менше 15 Euro/кг.

Казахстанський карботермічний метод [6] розроблений групою вчених із Казахського Національного Технічного університету, в основу якого теж покладено карботермічний процес перетворення кварциту для отримання кремнію сонячної якості.



а) карботермічний

б) Solsilc

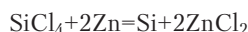
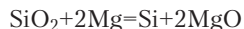
Рис. 3. Технологічні маршрути отримання кремнію електронної а) та сонячної б) якості із кварцитів

Для цього вони використали чистий кварц із рудників Казахстану. Виробництво здійснено в експериментальних дугових печах потужністю 300 із пропускну здатністю 250 кг/день. Процес забезпечив чистоту на рівні 99,95%. Для очистки металургійного кремнію дуже перспективним є так званий Elkem-метод. Компанія Elkem Solar працювала над розробкою нового процесу отримання сонячного кремнію (SoG-Si). Довгий час, починаючи ще з 90-х років процес очистки складався з 2-х стадій. Перша стадія – це очистка кремнієвого шлаку для видалення важливих домішкових елементів: В, С, Р, Al. Другий етап – це процес вилучення, який дозволяє видалити і інші елементи, при цьому енергоспоживання по відношенню до традиційного карботермічного методу знижується на 25%. Коефіцієнт корисної дії сонячних елементів, виготовлених на такому кремнії склав 15-16% [6]. Це не що інше як модернізований карботермічний метод.

І на кінець, розглянемо метод отримання кремнію шляхом електролізу. Електроліз був загальноприйнятим методом отримання Al, тому кремній може бути отриманий теж шляхом електролізу. Сам процес запатентований фірмою Stubergh [7] в 1997р. Процес базується на розчиненні у фториді та розкладі кварцу на кремній та кисень, кремній осаджується на електродах. Після цього, кремній дробиться і піддається кислотній очистці. Для отримання чистого продукту, кремній розплавляють, а потім кристалізують в зливки методом зонної плавки. В даному проекті разом з

фірмою Stubergh працюють також фірми SINTEF і IFE, які утворили компанію «Norwegian Silicon Refinery».

Існують і інші методи отримання металургійного кремнію, над якими працюють ряд компаній—це відновлення кремнію магнієм, алюмінієм та парами цинку згідно реакції:



В стороні також не залишились компанії Росії. В кінці 2005р в Росії створений дивізіон ООО «НИ-ТОЛ-Силикон». Головним напрямком роботи нової бізнес одиниці стане розвиток кремнійорганічного бізнесу, а саме випуску трихлорсилану і на його основі полікремнію з об'ємом випуску 10 тис. тон в 2007р., з виходом на потужності 20 тис. тон/рік. Основними конкурентними перевагами компанії є наявність підготовленого кваліфікованого персоналу, дешеві енергоресурси та сировина.

Виходячи зданого проведеного аналізу пропонується сучасна високо економічна технологічна схема виробництва полікремнію (рис. 4). Процес складається з трьох етапів. Кремній, що підлягає очистці, хімічно переводиться в леткий стан (трихлорсилан - TCS).

Дана легка сполука легко очищується за допомогою ректифікації (фракційної перегонки). Потім очищена сполука переводиться в дуже чистий полікремній. Слід зауважити, що кожний із вказаних етапів означає також зниження вмісту домішок на 2-3 порядки. Самим важливим етапом очистки є видалення домішок бору та вуглецю. Цей метод, який був використаний Ван Аркелем [7] ще в період II-ї світової війни, в підготовці чистих металів, широко відомий науковим колам. І на кінець, чистий полікремній може бути отриманий у вигляді як стержнів так і гранул.

Сама технологічна схема є дещо спрощеною, бо не включає в себе інші хлорсилани (моно-, ді-, поліхлорсилани), які утворюються в кількостях декількох відсотків. Також не виключені всі потоки, які б забезпечили безпеку процесу—азотний захист атмосфери, утворення відходів і інше.

Коротко зупинимось на даній технологічній схемі (рис. 4).

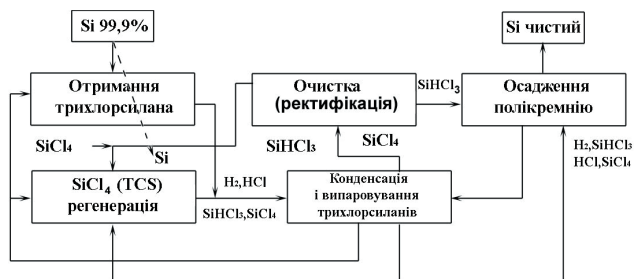


Рис. 4. Сучасна технологічна схема виробництва полікремнію

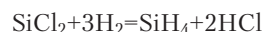
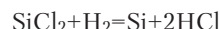
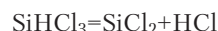
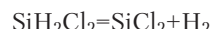
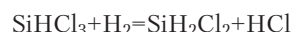
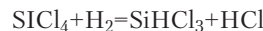
а) Синтез:

Кремній, що подається в процес (чистоти 99,95%-металургійний кремній вищої якості) дробиться в по-

рошок і вступає в реакцію з HCl в реакторі киплячого шару з утворенням трихлорсилану:



Доля трихлорсилану ніколи не складає 100%, бо залежить від умов реакції. Доля TCS складає лише 20-40%. Реакції, які протікають в реакторі можна подати так:



Як бачимо, сполуки SiHCl₃ і SiH₂Cl₂ є проміжними в сумарній реакції і в залежності від температури можна налаштувати реакцію на певний вид хлорсилану чи силану.

Тут доцільно дати б характеристику всіх цих сполук (табл. 2).

б) Ректифікація (перегонка.)

Кожна сполука із кожної суміші, яка отримується в даному процесі, може бути виділена і очищена.

Таблиця 2

Хімічні властивості сполук кремнію

№	Сполука	Теплота при 25°С, еВ	Точка плавлення С	Точка кипіння при 1ат °С	β
1.	SiCl ₄ (рідина)	-6,6	-70	+58	6,05
2.	SiHCl ₃ (рідина)	-4,9	-134	+33	4,83
3.	SiH ₄ (газ)	+0,34	-185	+112	1,14
4.	SiH ₂ Cl ₂ (рідина)	-4,2	-128	+28	3,6
5.	Si ₂ H ₆ (газ)	+0,36	-150	+114	1,1

де β – вага сполуки, необхідної для виготовлення в газовій фазі одиниці ваги кремнію.

Така суміш охолоджується і TCS очищається ректифікацією. При можливості інші хлорсилани використовуються для наступного етапу осадження полікремнію. Система ректифікаційних колон (кількість, послідовність і параметри) проектується з використанням математичної моделі формування полікремнію.

Трихлорсилан має точку кипіння при 33°С, що означає легкість в забезпеченні теплоізоляції, нагріву та охолодження ректифікованої колони.

Силан (силан) має точку кипіння вже 112 (114°С) і тому проблеми з ізоляцією, нагрівом та охолодженням тут є більшими, бо треба використовувати рідкий

азот. Ректифікація – це єдиний процес, який відповідає найбільш важливішій вимозі отримання самої високої чистоти – не використовувати і не вводити ніяких додаткових хімічних реагентів.

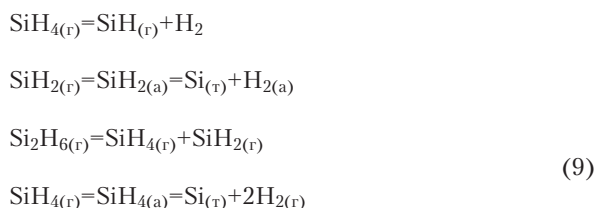
в) Хімічне осадження із парів (CVD).

Очищений TCS (або силан) подається в, так званий, реактор відновлення разом з воднем (у випадку з силаном водень не потрібний). Кремній можна отримувати у вигляді прутків (легко досягається висока чистота) або гранул (тут досягти високої чистоти важко).

З трихлорсиланом протікають наступні реакції:



Використовується температура в межах 1100-1150°C, в залежності від молярного співвідношення $\text{H}_2/\text{SiHCl}_3$. Коли використовується силан (дисилан), то використовують реакції:



де (г) – газ, (т) – тверда фаза, (а) – адсорбований.

Звичайно, дисилан збільшує швидкість росту та знижує коефіцієнт β до величини 1,1-тобто маємо в цьому випадку найвищий вихід полікремнію. Тут для реакції використовується температура на рівні 900-920°C. В зв'язку з більш низькою температурою осадження і відсутністю хлористих сполук, при використанні силану (дисилану) простіше досягти досить високої чистоти.

г) Видалення відходів.

Кремнієвий пил, який утворюється при використанні металургійного кремнію в реакторі кип'ячого шару (синтез, регенерація) може бути просто нейтралізований за допомогою вапняної суспензії, після чого вона практично залишається екологічно нейтральною, бо утворюються поверхневі оксиди. Відходи при цьому можна бректувати і використовувати повторно. Інші відходи – трихлорсилани, які містять в собі азот і хлористий водень – можуть теж легко видалятися системною зрошення водою (в скруберах), а вода нейтралізується вапняком.

д) Використання азоту.

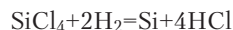
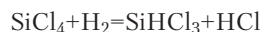
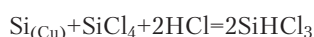
Азот використовується, як холодоагент і як захисний газ (бо ні TCS чи силан не можуть вступати в реакцію з атмосферою) з точкою роси не гірше -70°C.

е) Конденсація і сепарація.

Така система ефективно розділяє дві компоненти: водень, хлористий водень, хлорсилани на базі різниці в їх точках кипіння. В принципі, ця система прекрасно керується через теплообмінники при наявності рідкого азоту в ролі охолоджуючого реагенту. Система дає можливість повторного використання всіх компонент на рівні чистоти, яку підтримує процес.

ж) Регенерація STC (тетрахлориду кремнію SiCl_4).

Вона, в основному, здійснюється в реакторах кип'ячого шару. Ці процеси описуються реакціями:



Cu – каталізатор.

з) Тетрахлорид кремнію (STC- SiCl_4).

В даному процесі ми його використовуємо як сировинне джерело. Його отримують реакцією хлорування ферум-силіцію (Fe-Si), яка описана вище. Це дозволяє використовувати надлишок хлору в процесі.

6. Висновки

Виходячи із вище викладеного, можна вже сформувати сутність процесу: виробництво полікремнію в замкнутому циклі за допомогою хімічного парового осадження, де газоподібні субстанції фільтруються для видалення механічних домішок, потім охолоджуються рідким азотом, а хлористий водень відділяється через сублімацію і разом з тетрахлоридами кремнію використовується для синтезу трихлорсилану. Трихлорсилани повторно використовуються для хімічного осадження парів кремнію, що і збільшує його вихід.

Звичайно ще більш ефективним може бути дисиланний процес. Дисилан можна отримати за рахунок реакцій:



Це збільшує не тільки швидкість росту майже в 2 рази, але і збільшує вихід чистого полікремнію майже в п'ять разів.

Література

1. С. Зи Технология СБИС/. Под ред. в двух томах; [перев., с английского под ред., Ю. Д. Чистякова.]-М: Мир, 1986.-720 с.
2. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем./Степан Новосядлий; –Івано-Франківськ: Сімик, 2003, -351 с.
3. Michael Rogel/CLSA. Silicon and The Solar Sector Mapping a new World// 2nd Solar Silicon Conference, April11, 2005 p 111.
4. Hubert A/Aulich. Solar Grade Silicon the view from a major user// 2nd Solar Silicon Conference, April 11, 2005 –p 118.
5. Karl Hesse and Ewald Schindbeck/ wacker Polysilicon. Feed-stock for the photovoltaic industry//2nd Solar Silicon Conference, April11, 2005–p126.
6. Abdulayev M. A. Kazakhstan's project of receiving the Solar grade Silicon by carbothermic process on the small power furnaces with further fining //2nd Sola Silicon Conference, April11, 2005 –p 184.
7. Jan R., Stubergh and Zhoughna Liu. Preparation of pure silicon by elektrovining a Bytownite–Cryolite Melt.// Metallurgical and Materials Tranactios B.–December 1996–r.27BN06.