

С.Л.Нагорный⁽¹⁾, Т.В.Критская, Л.Я.Шварцман⁽¹⁾

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ СОЛНЕЧНОГО КАЧЕСТВА

⁽¹⁾*Казенное предприятие «Запорожский титано-магнєвий комбінат»,
Запорожская государственная инженерная академия*

Розглянуто сучасний стан технологій одержання кремнію для фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії (ФЕП). Дано оцінку ефективності деяких технологічних схем і можливості одержання кремнію із заданим рівнем вмісту домішок. Подано аналіз впливу ряду домішок на якість кремнію для ФЕП і їх характеристики.

Рассмотрено современное состояние технологий получения кремния для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (ФЭП). Дана оценка эффективности некоторых технологических схем и возможности получения кремния с заданным уровнем содержания примесей. Представлен анализ влияния ряда примесей на качество кремния для ФЭП и их характеристики.

Введение. Интерес к полупроводниковому кремнию вызван целым рядом факторов, связанных со всеобщей компьютеризацией, совершенствованием технологий электронного приборостроения, а также остро стоящей проблемой энергосбережения, поскольку запасы нефти, газа, угля и урана на планете, на которых базируется современная энергетика, в скором времени будут исчерпаны. Следует также учитывать глобальное потепление климата, вызванное парниковым эффектом – повышением содержания диоксида углерода в атмосфере за счет сжигания углеводородов. До 40% роста энергопотребления приходится на сектор индустрии, занимающийся производством электроэнергии. Соответственно высоки выбросы диоксида углерода, связанные с сектором энергетики [1]. По данным статистики, ежегодный прирост потребления энергии составляет 2,5...3,5%. Если такая тенденция сохранится, каждые 25...30 лет энергопотребление будет удваиваться. Атомная энергетика в качестве альтернативного источника энергии также не решит глобальных задач энергообеспечения по причинам сложности гарантирования безаварийной работы атомных электростанций, обеспечения экологической безопасности, а также проблем захоронения ядерных отходов.

Идеальным энергетическим газом можно считать водород, который эффективно конвертируется в полезную энергию. Единственным побочным продуктом при его сжигании являются вода или водяной пар. При производстве водорода из воды могут быть использованы фотогальванические преобразователи на основе кремния, что позволит создать экологически чистую и непрерывную энергетическую систему (рис.1).

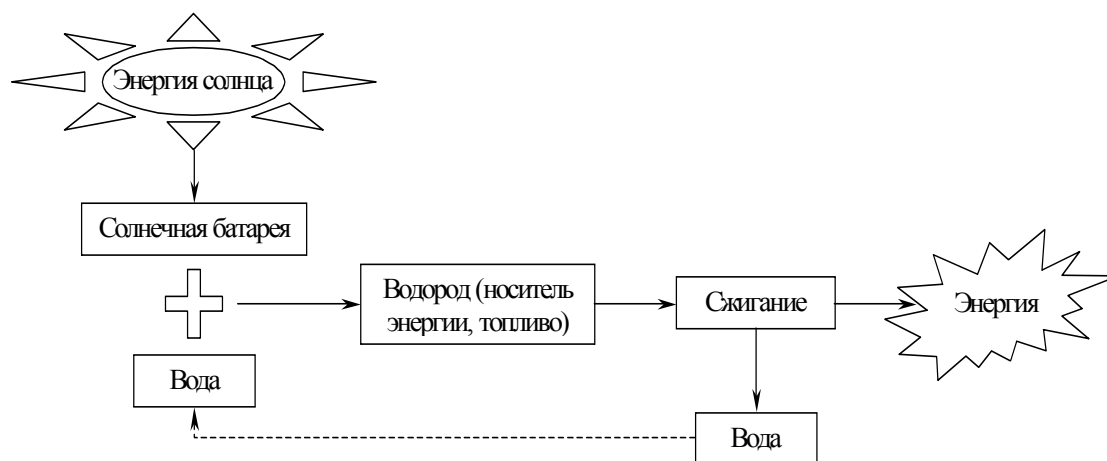


Рисунок 1 – Схема возможного использования солнечной энергии для производства водорода

Поэтому расширение использования экологически чистых видов энергии из возобновляемых источников является чрезвычайно актуальным.

Среди альтернативных возобновляемых источников энергии (ветровая, приливная, волновая, геотермальная, гидроэнергия, биотопливо, энергия биомассы) солнечная фотоэнергетика обладает наибольшим потенциалом долгосрочного роста. Солнечного света, падающего на Землю каждую минуту, достаточно для удовлетворения годовой потребности человечества в энергии. Около 90% выбросов, связанных с производством энергии, можно предотвратить, заменив традиционные источники энергии фотоэлектрическими. Согласно прогнозу Мирового энергетического агентства (IEA), в 2004-2030 гг. производство электроэнергии за счет возобновляемых источников возрастет почти в три раза, в том числе солнечной энергии – в 60 раз. В 2007 г. в различных странах мира было инвестировано около 71 млрд. долларов США в новые мощности по производству электроэнергии за счет возобновляемых источников, 47% капиталовложений пришлось на сектор ветряной энергетики, 30% – на рынок солнечной фотовольтаики [2].

Для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую используют полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и, прежде всего, ФЭП на основе кремния. Это обусловлено их большим КПД, простотой конструкции, достаточностью запасов кремния в земной коре, а также отлаженностью технологий его производства. Для достижения рентабельности наземной солнечной энергетики необходимо снижение стоимости вырабатываемой электроэнергии до 0,035...0,05 долларов США/кВт·ч (в настоящее время – 0,25...0,56 долларов США/кВт·ч) и доведения срока службы солнечных модулей до 20...30 лет [3,4].

В современных солнечных энергосистемах более 85% ФЭП изготавливают на основе кремниевых пластин, на стоимость которых приходится более 50% всей стоимости ФЭП [4]. Поэтому чрезвычайно актуальным является освоение технологий дешевого кристаллического кремния с высокими эксплуатационными свойствами.

Эффективность работы ФЭП зависит от его конструкции, а также оптических и электрофизических свойств используемого кремния: ширины запрещенной зоны, величины времени жизни неравновесных носителей заряда ($\tau_{ннз}$), степени легирования, коэффициента отражения света от поверхности пластины, выпрямляющих характеристик p - n -перехода, спектрального положения основной полосы поглощения солнечного излучения и др.

При попадании света на солнечный элемент фотоны, энергия E_ϕ которых меньше ширины запрещенной зоны E_g , не вносят вклад в выходную мощность ФЭП. При $E_\phi > E_g$

каждый фотон вносит вклад в выходную мощность, равный E_g , а остальная его энергия переходит в теплоту. Максимальная мощность видимого светового потока находится в диапазоне длин волн 0,4...0,8 мкм. Для создания ФЭП пригодны полупроводниковые материалы с $E_g = 1...2$ эВ.

Полупроводниковый кремний, в зависимости от кристаллической структуры, имеет различную величину параметра E_g :

- 1,1 эВ – кристаллический (моно-и поли-);
- 1,7...1,9 эВ – аморфный (пленки толщиной $\sim 1,0$ мкм, осаждаемые из газовой фазы на подложку в процессе разложения моносилана SiH_4);
- $\sim 1,45$ эВ – микрорекристаллический (пленки поликристаллического кремния с размером зерна 1...50 нм, осаждаемые из газовой фазы).

Таким образом, при создании ФЭП для наземной фотоэнергетики могут быть использованы практически все виды кремния достаточно высокой степени чистоты. В то же время эффективность преобразования солнечного излучения существенно выше у кристаллического кремния. Самый высокий КПД единичного серийного ФЭП для наземной фотоэнергетики (17...20,5%) достигнут с использованием монокристаллического кремния, полученного по методу Чохральского. Из мультикристаллического кремния, перекристаллизованного из рафинированного металлургического кремния, величина КПД составляет 12...14%, из поликристаллического кремния – 14...15,5%, из аморфного кремния – 5...10% [3,4]. Расход кремния на 1,0 Вт произведенной электрической мощности для ФЭП из монокристаллического кремния составляет менее 5 г/Вт, из поликристаллического кремния - 13,7, из аморфного кремния - 0,3 г/Вт.

Электрические свойства кремния для ФЭП в значительной степени зависят от вида и концентрации в нем примесей. Различные примеси по-разному влияют на эффективность преобразования солнечной энергии. Содержание электрически активных примесей должно обеспечивать эффективный перенос генерированных светом носителей заряда, не допускать их рассеивания и не приводить к снижению времени жизни неравновесных носителей заряда $\tau_{ннз}$ (вследствие искажения кристаллической решетки и комплексообразования). Обычно в кремнии солнечного качества концентрации бора или фосфора не должны существенно превышать уровень $(1...2) \cdot 10^{16}$ см⁻³. Эффективность преобразования солнечной энергии решающим образом зависит от концентрации дефектов и примесей, влияющих на $\tau_{ннз}$ в активных слоях ФЭП. Высокие значения $\tau_{ннз}$ обеспечивают высокие величины тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, вследствие уменьшения обратного тока насыщения ФЭП. Примеси, имеющие глубокие уровни в запрещенной зоне кремния (*Zn, Mn, Fe, Cr, Cu, Au, W, Mo, V, Ti* и др.) являются эффективными центрами рекомбинации и снижают величину $\tau_{ннз}$. Эффективные коэффициенты распределения этих примесей находятся на уровне $10^{-4}...10^{-8}$, то есть опасность загрязнения ими кристалла кремния невелика. Однако поведение металлических примесей в кремнии зависит от ряда дополнительных факторов, таких как их предельная растворимость, коэффициент диффузии, уровень легирования, концентрации фоновых примесей (кислорода, углерода) и дефектов кристаллической структуры, технологических аспектов получения и термической обработки кристаллов кремния. В настоящее время для ряда примесей установлены предельно допустимые концентрации в кремнии, обуславливающие порог примесной деградации ФЭП [5,6]: *Cu* – $6 \cdot 10^{17}$, *Cr* – $1 \cdot 10^{14}$, *Mo* – $6 \cdot 10^{11}$, *Mn* – $1,6 \cdot 10^{14}$, *Fe* – $2 \cdot 10^{14}$, *Co* – $1 \cdot 10^{15}$, *Ni* – $5 \cdot 10^{15}$, *Al* – $3 \cdot 10^{15}$, *Au* – $6 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

Влияние металлических примесей на КПД солнечного элемента показано на рис.2 [7].

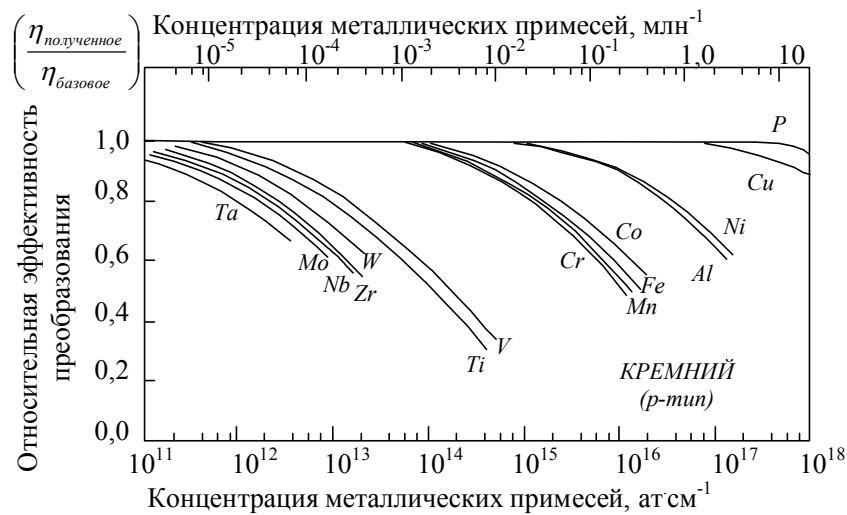


Рисунок 2 — Влияние примесей в кремнии на КПД солнечных элементов [7]

Величина η , характеризующая эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электрическую на поверхности Земли, может быть определена как:

$$\eta_{\text{ФЭП}} = \frac{P_{\text{ФЭП}}}{P_c (AM1, \varphi)},$$

где $P_{\text{ФЭП}}$ — электрическая мощность, получаемая с единицы площади ФЭП; P_c — мощность солнечного излучения, поступающего под углом φ на облучаемую поверхность ФЭП на поверхности Земли в условиях поглощения первичного излучения Солнца «атмосферной массой» AM1.

Из рис.2 видно, что наиболее сильное влияние на КПД оказывают такие примеси как *Mo*, *Nb*, *Zr*, *W*, *Ti*, *V*, *Cr*, *Mn*, *Fe*, *Co*, в то время как *Al*, *Ni* и *Cu* начинают оказывать заметное влияние лишь при концентрациях $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Авторы работ [3,8] установили корреляцию между равновесным коэффициентом распределения k_0 примеси и примесным порогом деградации ФЭП: допустимы более высокие концентрации тех примесей, для которых значения k_0 выше.

Примесь бора широко используемая при легировании кремния для ФЭП может образовывать с кислородом комплексы *B-O* с глубоким уровнем в запрещенной зоне кремния. Наличие таких комплексов снижает $\tau_{\text{ннз}}$, препятствует достижению высоких КПД, приводит к деградации характеристик ФЭП в процессе эксплуатации. В качестве альтернативы может быть применено легирование галлием до концентраций $5 \cdot 10^{15} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [9].

Примеси титана и ванадия признаны наиболее вредными в кремнии солнечного качества. Однако в присутствии меди в кремнии с повышенным содержанием титана качество солнечных батарей улучшается [10]. Причиной этого может быть нахождение меди в кремнии солнечного качества в виде силицидов, которые практически не оказывают влияния на объемное $\tau_{\text{ннз}}$. Другие металлические примеси, присутствуя в твердом растворе и находясь вблизи обедненной зоны *p-n*-перехода, оказывают сильное влияние на напряжение холостого хода и коэффициент заполнения ВАХ [11,12]. Магний в концентрации $3 \cdot 10^{12} \dots 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ не вызывает деградации ФЭП [10], а концентрация примеси натрия, вследствие высокого коэффициента диффузии, должна быть ограничена величиной $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [13]. Примеси кислорода и водорода могут участвовать в процессах пассивации дефектов и примесей в кремнии, что обеспечивает повышение объемного $\tau_{\text{ннз}}$ [14]. Достаточно неоднозначно поведение примеси углерода. Повышенная его

концентрация ($0,8...2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) позволяет сохранить на высоком уровне величины $\tau_{\text{ннз}}$ в процессах термических обработок [15]. В то же время при таких концентрациях углерода высока вероятность образования карбидов ряда примесей, что приводит к образованию вокруг их скоплений дефектных областей и примесных атмосфер [10]. Авторы работ [7,16] по влиянию на КПД солнечных элементов выделяют три группы металлических примесей:

- *V, Ti, Zr* - предельно допустимая концентрация $10^{12}...10^{13} \text{ см}^{-3}$;
- *Fe, Na, Cr, Mn* - предельно допустимая концентрация $10^{14}...10^{15} \text{ см}^{-3}$;
- *Ni, Cu, Al* - предельно допустимая концентрация $2 \cdot 10^{15}...1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Эффективность работы ФЭП зависит от уровня технологий, предшествовавших получению прибора, в том числе технологий исходных сырьевых продуктов (кварцита, водородного восстановителя) и уровня их чистоты, карботермического восстановления кварцитов в рудотермических печах, рафинирования металлургического кремния, металлургической переработки полученного кремния в кремний «солнечного качества» (*SoG-Si*) с использованием процессов направленной кристаллизации.

В связи с требованием низкой стоимости, технология *SoG-Si* предусматривает иной подход к достижению требуемого уровня чистоты, чем при производстве поликристаллического кремния для электроники. Обе эти технологии включают карботермическое восстановление кварцитов и последующую очистку полученного металлургического кремния (*MG-Si*). Однако, если при получении поликристаллического кремния для электроники достаточным уровнем чистоты *MG-Si* является 98,4...98,6%, то для металлургической переработки в *SoG-Si* требуется чистота *MG-Si* 99,9...99,99.

Рафинирование *MG-Si* включает ряд процессов, которые у различных производителей могут существенно отличаться. Наиболее часто применяются вакуумное рафинирование, обработка расплава кремния силикатными шлаками (расплавы оксидов кальция, магния, алюминия), экстракция и кислотное выщелачивание, градиентная плавка, обработка расплава активными газами (парами воды, кислородом, оксидами углерода, хлором в смеси с аргоном, воздухом и пр.), аргонной плазмой, нормальная кристаллизация [11,12]. Содержание примесей в рафинированном металлургическом кремнии для получения мультикристаллических блоков (марка *UMG*) должно находиться в пределах 1,0...0,1 ppmw.

В табл.1 приведен примесный состав рафинированного кремния от различных производителей.

Таблица 2 – Содержание примесей в рафинированном кремнии от различных производителей, ppmw

Элемент	ЗАО «Кремний», Россия		Зарубежные производители			
	Исходный кремний	Рафинированный кремний	Исходный кремний	Рафинированный кремний ¹	Рафинированный ¹ кремний	Рафинированный ² кремний
<i>Si</i>	98,4%	> 98,8%	97 – 99%	> 98,5%	<i>Si</i> -основа	<i>Si</i> -основа
<i>Fe</i>	0,5	0,5	0,3 – 0,5	0,3...0,5	23...0,06	< 0,04...0,01
<i>Ca</i>	0,3	0,3	0,2	0,01...0,05	0,31...0,059	< 0,05
<i>Al</i>	0,5	0,5	< 0,6	0,1...0,5	2,5...2,6	0,34...0,12
<i>Ti</i>	0,045	0,045	0,05	0,05	0,05...0,0005	< 0,005
<i>Ni</i>	50	50	0,01...0,5	0,01...0,03	0,21...0,01	Ni < 0,01
<i>V</i>	10		0,01...0,5	0,01...0,03	0,079...0,004	V < 0,005

¹ Khattak C.P., Joyce D.B., Schmid F. Production of Solar Grade (SoG) Silicon by Refining Liquid Metallurgical Grade (MG) Silicon //NREL Technical monitor: Marta Symko-Davies. Crystal Systems, Inc. 2001. 40 p.

² UMG BSI – Becancour Silicon Inc. Canada

<i>Cr</i>	50	50	0,01...0,5	0,01...0,03	0,004...0,045	< 0,01
<i>Co</i>			< 0,005	< 0,005	0,002...0,07	< 0,01
<i>Mo</i>			< 0,005	< 0,005	0,004...0,022	< 0,05
<i>Bi</i>	0,02					
<i>Cu</i>	0,025	0,025			0,018...0,12	Cu < 0,01
<i>P</i>	80	1			13...6,8	7,1...5,5
<i>Na</i>	50		-	-	0,21...0,1	< 0,01
<i>B</i>	100	40	0,005	0,004	0,68...5,8	0,99...0,91
<i>C</i>	400	200	0,03	0,02		10...22
<i>Zn</i>	0,1		-	-		< 0,05
<i>Mn</i>	0,05	0,025	0,03	0,03		< 0,005
<i>As</i>	0,1		-	-		0,01...0,04

Для получения чистого поликристаллического кремния используют различные методы, суть которых сводится к переводу металлургического кремния в соединения, их последующей очистке физико-химическими методами до уровня содержания примесей $10^{-7} \dots 10^{-10}\%$ и получению чистого поликристаллического кремния методом водородного восстановления или другими методами.

Требования, предъявляемые к чистоте поликристаллического кремния, могут быть представлены следующим образом (10^{-7} , %_{ат}):

- углерод < 300;
- кислород < 50;
- элементы V группы (фосфор, мышьяк и др.) < 1,5;
- элементы III группы (бор, алюминий и др.) < 0,30;
- тяжелые металлы < 0,10;
- все другие элементы < 0,001.

Данные требования являются достаточно условными, так как влияние примеси определяется суммарным эффектом взаимодействия различного рода примесных элементов, дефектов структуры кристалла и термическим операциями при изготовлении ФЭП.

Особого внимания поэтому заслуживают технологии, которые по своей природе не могут создавать условия для перехода металлической примеси в кристалл.

Примером такой технологии может служить гидридный метод (см. рис.3) получения поликристаллического кремния из моносилана. При нормальных условиях моносилан является газом, а большая часть металлов не образует летучих гидридов. Таким образом, кремний, полученный термическим разложением моносилана, будет содержать металлические примеси в существенно меньшей степени, чем полученный другими методами.

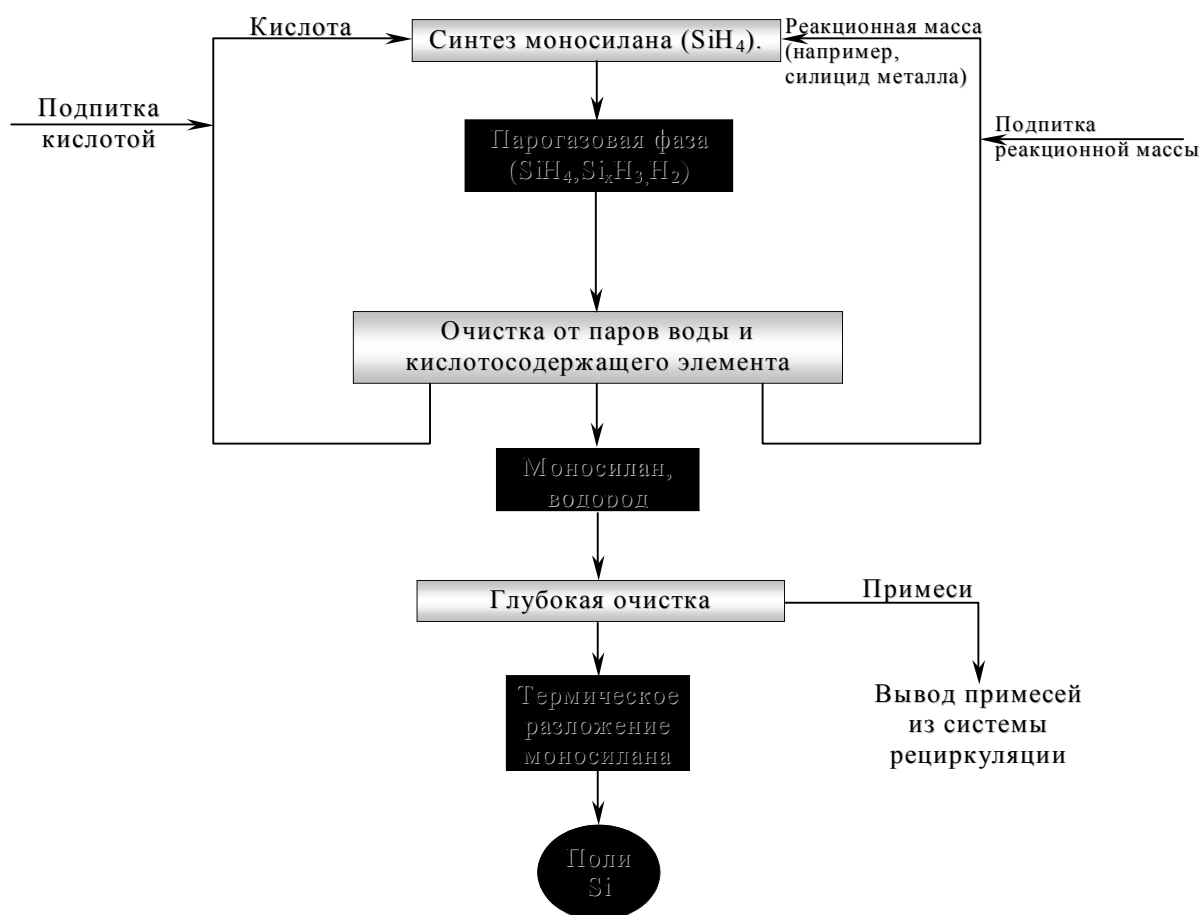


Рисунок 3 – Принципиальная схема получения поликристаллического кремния гидридным методом через силицид магния

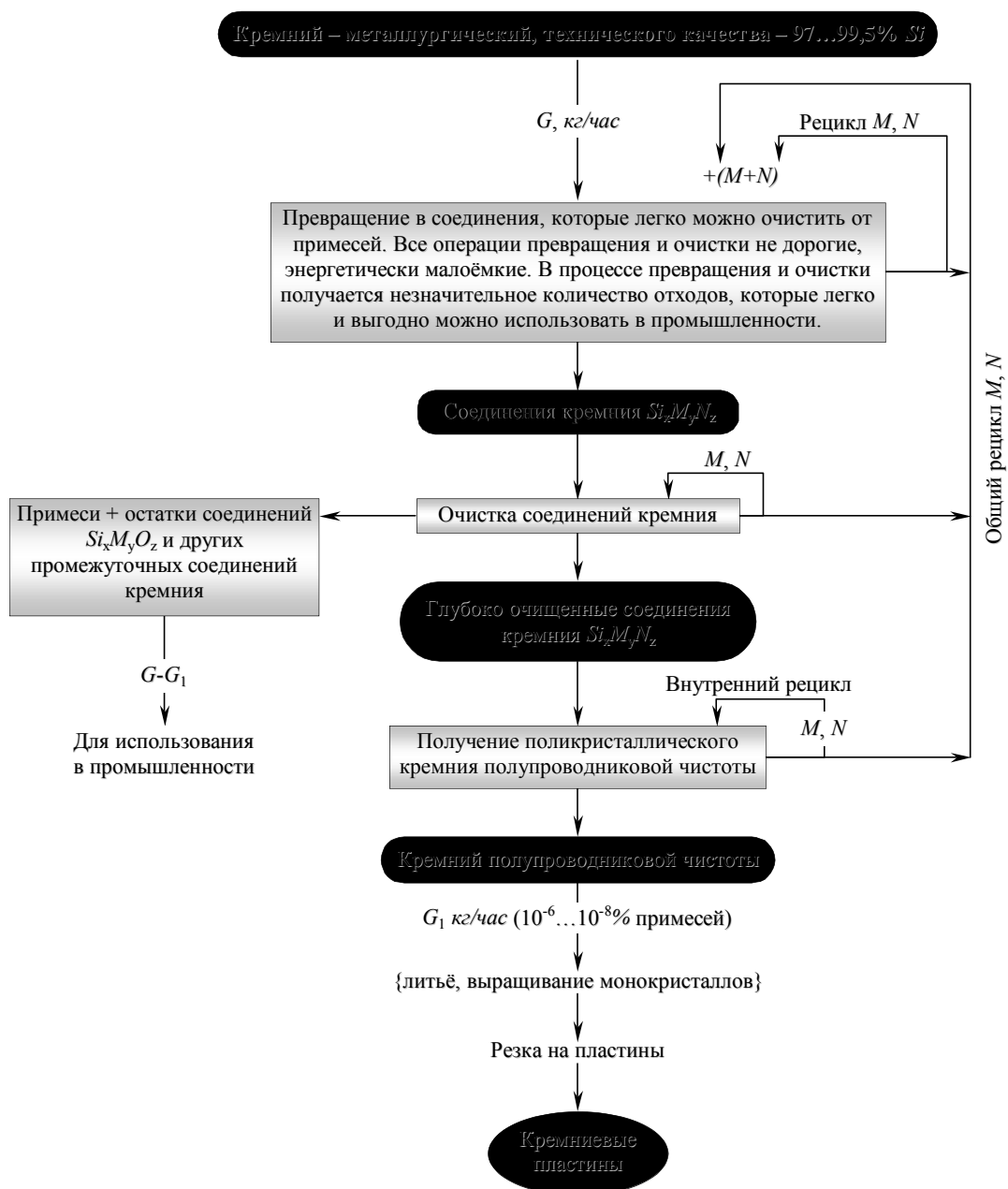
Такой подход значительно упрощает и удешевляет технологию получения кремния для ФЭП, обеспечивая выгодное сочетание параметров «цена-качество».

Современный подход к этапам технологии поликристаллического кремния полупроводниковой чистоты можно проиллюстрировать схемой, представленной на рис.4.

При проведении очистки из системы необходимо выводить примеси. Поскольку содержание их сравнительно невысоко, как правило, их выводят вместе с основным компонентом $Si_xM_yN_z$ или его кремнийсодержащими производными, что увеличивает потери.

Структура потерь при получении кремния полупроводниковой чистоты выглядит следующим образом:

- потери кремния в виде пылевых частиц;
- потери соединений $Si_xM_yN_z$ с абгазами;
- потери кремния в форме полисиланхлоридов;
- потери кремния с кварцевым тиглем при выращивании кристаллов;
- потери кремния при резке;



G - объем используемого металлургического кремния;
 G_1 - объем произведенного кремния полупроводниковой чистоты

Рисунок 4 – Пример общего подхода к построению технологических схем получения поликристаллического кремния полупроводникового качества

– потери с промежуточными продуктами, образующимися одновременно с целевым компонентом.

Основные направления по снижению потерь:

- превращение побочных продуктов реакции в основной продукт $Si_xM_yN_z$;
- ступенчатая конденсация продуктов реакции с их разделением и возвратом в голову процесса – рециклирование;
- выделение конденсирующихся веществ из газовой фазы с возвратом газа в основную реакцию (внешний рецикл);
- глубокая конденсация абгазов;
- возврат пылевых частиц в реакторы синтеза основного вещества;
- переработка полисиланхлоридов в тетрахлорсилан.

На стадии металлургической переработки повышение извлечения кремния возможно при использовании больших (массой более 200 кг) загрузок в тигель при выращивании моно- и мультикристаллов, а также за счет организации процессов с непрерывной либо циклической дозагрузкой кремниевой шихты в процессе кристаллизации.

Достаточный резерв экономии кремния представляет использование станков проволочной резки, которые необходимы как при резке на пластины, так и при резке литых блоков или слитков после процессов направленной кристаллизации и литья [17]. В результате применения такого подхода выход кремния можно довести до 80...90%, однако все операции по снижению потерь связаны с энергетическими затратами, что может привести к удорожанию продукции. Поэтому в каждом конкретном случае мероприятия по снижению потерь должны подвергаться тщательному экономическому анализу и расчету с выбором наиболее рациональной технологической схемы. Оценка эффективности технологии должна также учитывать эффективность преобразования солнечной энергии гипотетическим солнечным элементом, изготовленным из кремния, полученного по данной технологии за период срока службы солнечной батареи.

Заключение. Необходимость удешевления вырабатываемой электроэнергии с помощью ФЭП требует поиска путей снижения стоимости кристаллического кремния при обеспечении уровня его чистоты класса *SoG-Si*. Наряду с использованием высокосовершенного монокристаллического кремния может использоваться мультикристаллический кремний со столбчатой структурой, концентрацией электрически активных примесей $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и величиной $\tau_{\text{нпз}} \sim 2 \text{ мкс}$. ФЭП на основе мультикристаллического кремния из перекристаллизованного поликристаллического кремния полу-проводниковой чистоты имеют величину КПД на 1,5...2,0% выше, чем на основе мультикремния из перекристаллизованного *UMG-Si*. Следует отметить все расширяющееся использование тонкопленочных технологий изготовления ФЭП, и в первую очередь на основе аморфного гидрированного кремния (*a-Si-H*), его твердых растворов с германием (*a-SiGe:H*), углеродом (*a-SiC:H*) и азотом (*a-SiN:H*) [18,19]. Уникальные свойства этих материалов, их технологичность, низкая себестоимость позволили создать дешевые, достаточно эффективные солнечные батареи больших площадей при расходе кремния в десятки раз меньшем, чем при использовании кремниевых пластин [20,21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 2007 World PV industry report highlights/«Marketbuss-2008»//www/osp/ru/cv/2008/25/ 5245612.
2. <http://solareview.blogspot.com/search/label/09.06.2008>
3. Solar Cell Engeneering // Greenpress. 2007. - 543 p.
4. *Непомнящих А.И., Еремин В.П., Красин Б.А. и др.* Мультикристаллический кремний для солнечной энергетики // Известия Вузов. Материалы электронной техники. 2002. - № 4. - С.16-24.
5. *Рейви Л.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии - М.: Мир, 1984. - 475 с.
6. *Adel Ben Arab.* Votovoltaic properties and high efficiency of preferentially doped polysilicon solar cells //Solid State Electron. - 1995. - № 8. - P.1441-1442.
7. *Пелевин О.В., Гришин В.П.* Производство полупроводниковых материалов для перспективных преобразователей солнечной энергии / Итоги науки и техники. Металлургия цветных металлов. - Т.19. - С.3-48.
8. *Dietl J., Halmreich D., Sirtl E.* «Solar» Silicon. Crystls Growth, Properties and Applications // Springer Verlag. - 1981. - V.5, - P.43-107.
9. Патент EC 1114885 A1. CZ Single Crystal Doped Witch Ga and Wafer and Method for Production

- here of / *T.Abe, T.Hirasawa, K.Tokunaga, T.Igarashi, M.Yamaguchi*. - Приоритет: 28.05.1999, JP №15069799; Shin-Etsu HandotaE Co., Ltd. - Оpubл. 11.07.2001 - Бюллетень 2001. - № 23.
10. *Немчинова Н.В., Бельский В.А., Бычинский В.А.* Динамика поступления и распределения примесных элементов в кремний высокой чистоты, получаемый карботермическим способом // Известия вузов. Материалы электронной техники. - 2004. - № 6. - С.11-15.
 11. *Басин А.С., Шишкин А.В.* Получение кремниевых пластин для солнечной энергетики: Методы и технологии. - Новосибирск: ИТ СО РАН. - 196 с.
 12. *Абдюханов И.М.* Разработка основ технологии производства металлургического кремния повышенной чистоты для наземной фотоэнергетики // Российский химический журнал. -2001. - Т.45. - № 5-6. - С.107-111.
 13. *Фаренбрух А., Бьюб Р.* Солнечные элементы. Теория и эксперимент. - М.: Энергоатом-издат, 1987. - 280 с.
 14. *Eyer A., Rauber A., Goetzberger A.* Silicon sheet materials for solar cells // Devices and Technologies. - 1990. - V.5. - № 2. - P.239-257.
 15. *Критская Т.В.* Влияние углерода на электрофизические параметры и поведение примесей в монокристаллах кремния, выращенных по методу Чохральского / Металлургия (Труды ЗГИА). - Запорожье: РИО ЗГИА, 2001. - Вып.5. - С.73-77.
 16. *Елисеев И.А., Непомнящих А.И.* Предельные концентрации примесей в солнечном кремнии / «Кремний-2007». Тезисы докладов 4-й Российской конференции с международным участием. - М.: МИСиС, 2007. - С.33-34.
 17. *Vojtechovsky K.* New Wire Saw Machine AWSM 3800.5 – THEMIS a.s. Production // «Silicon-2006». The Tenth Scientific and Business Conference. Roznov pod Radhostem, Czech Re-public. - 2006. - P.94-113.
 18. *Казанский А.Г.* Аморфный гидрированный кремний – материал электронной техники больших площадей // Известия вузов. Материалы электронной техники. - 1998. - № 4. - С.4-7.
 19. *Bergmann R.B.* Crystalline Si thin - film Solar cells: A review // Appl. Phys. A. - 1999. - V.69. - № 2. - P.187-194.
 20. *Мартынов В.В.* Политроника - новое слово в электронике XXI века // Электроника. Аспекты развития. - М.: ЦНИИ электроники. 2004. - С.425-451.
 21. Solar Generation. EPIA, Oct. 2004. <http://www.epia.org/>

Стаття надійшла до редакції 30.12.2008 р.

Рецензент, проф. І.Ф.Червоний