ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИС

Практическое занятие №1

по курсу Ф-ХОМиНЭ

Полупроводниковая интегральная схема (ИС) -

функциональный электронный узел, элементы и соединения которого конструктивно неразделимы и изготавливаются одновременно в единном технологическом процессе в объёме и на поверхности общего кристалла.

Элемент ИС

любой элемент, выполняющий активную или пассивную функцию, и который является неотделимым от основания схемы (подложки), на которой он изготовлен.

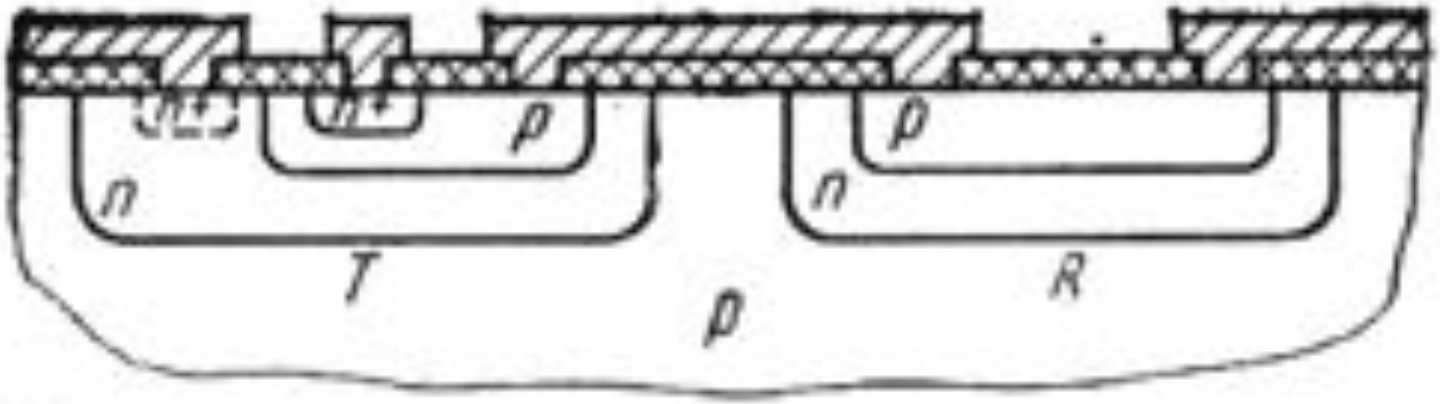
Кристалл ИС

часть полупроводниковой пластины, как правило, квадратной или прямо-угольной формы, которая является законченной ИС.

СТРУКТУРА ИС

определённое расположение по глубине кристалла локальных областей, отличающихся толщиной, типом электропроводности и характером распределения примеси

Фрагмент ИС с диффузионно-планарной структурой



T - биполярный n-p-n транзистор

R - резистор

Технологическая совместимость

структурное подобие элементов ИС, позволяющее осуществлять их формирование одновременно в едином технологическом процессе.

Технология изделий интегральной электроники

совокупность технологических процессов, обеспечивающих при технологической совместимости различных элементов ИС формировать их одновременно в едином технологическом процессе.

Базовая технология

ИС различных серий и функционального назначения имеют единую структуру и единую базовую технологию.

Базовая технология характеризуется:

- ***Определённой технологической последовательностью обработки:***
- ***Определённым комплектом оборудования;***
- ***Постоянной отработанной настройкой оборудования (жёсткими технологическими режимами).***

***Базовая технология** не зависит от:*

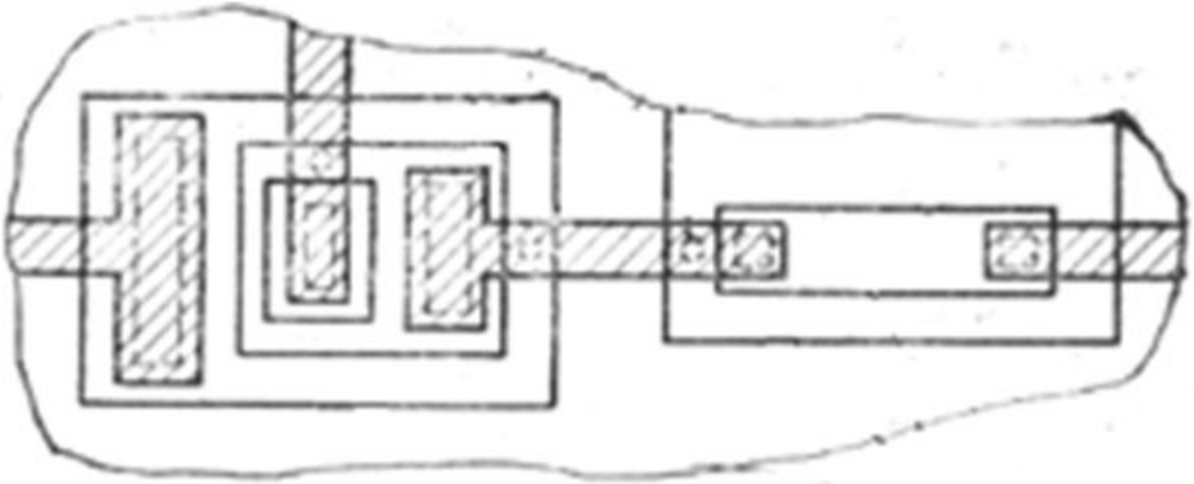
- *Размеров элементов ИС в плане;*
- *Их взаимного расположения;*
- *Рисунка межсоединений.*

Данные свойства для конкретной ИС определяются при топологическом проектировании и обеспечиваются фотолитографией – процессом избирательного травления слоёв с применением защитной фотомаски

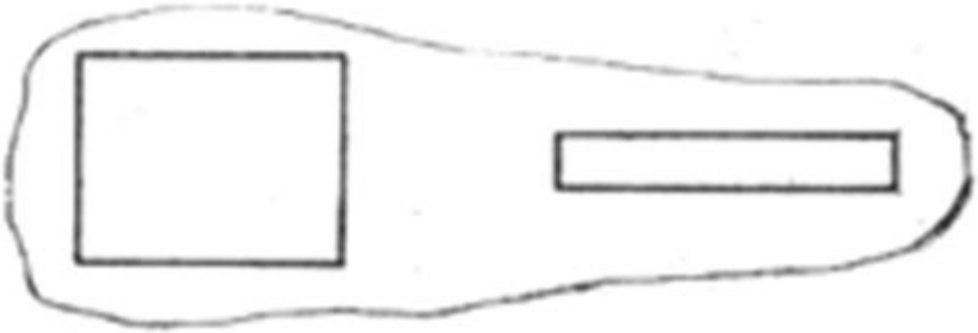
Топология ИС

чертёж, определяющий форму, размеры, и взаимное расположение элементов и соединений ИС в плоскости, параллельной плоскости кристалла.

Фрагмент топологии ИС



Фрагмент общей топологии



Фрагмент топология базового слоя

Планарная технология

заключается в том, что все элементы всех классов ИС формируются с одной стороны полупроводниковой пластины. Обратную сторону полупроводниковой пластины называют непланарной

Общая характеристика технологического процесса изготовления ИС

-Общее количество операций при изготовлении ИС может достигать 300 и более, продолжительность полного цикла обработки более 100 ч.;

-Технологический процесс охватывает разнообразные по физическим принципам, методам контроля технологическому оснащению методы обработки;

-По своему назначению и месту, занимаемому в общем процессе производства ИС, все операции объединяются в самостоятельные (частные) технологические процессы.

Группы технологических процессов ИС

1. Заготовительные процессы;
2. Обрабатывающие процессы;
3. Сборочно-контрольные процессы.

Группа процессов (операций)
Заготовительная
Обрабатывающая
Сборочно-контрольная
Получение слитков
Разрезание слитков
Обработка пластин
Изготовление деталей корпуса
Сборка узлов корпуса
Эпитаксия
Окисление
Фотолитография
Диффузия
Хим. обработка
Вакуумное напыление
Функциональный контроль
Разделение пластин
Монтаж кристаллов
Разварка выводов
Герметизация
Контроль и маркировка
Упаковка

Особенности заготовительных процессов

Обеспечивают процессы второй и третьей групп

- **Специфичность методов обработки и оборудования по своему характеру близки к приборостроительному производству;**
- **Независимость методов обработки от конкретной структуры ИМС;**
- **Обычно организуются на специализированных предприятиях, связанных с предприятиями второй и третьей групп процессов, договорами на поставку продукции.**

Особенности обрабатывающих процессов

- Вторая группа процессов объединяет все операции, необходимые для формирования структур ИМС в групповых процессах и их функционального контроля;

- Наиболее полно отражают особенности структуры ИМС и главные черты планарной технологии;

- Несмотря на разнообразие физико-химических принципов, лежащих в основе процессов данной группы, их объединяет ряд характерных признаков, требующих их концентрации на различных участках одного предприятия.

Важнейшие признаки, требующие концентрации обрабатывающих процессов

1) взаимосвязь производственных участков, обусловлена цикличностью технологического процесса (пластины многократно возвращаются на определенные участки для формирования очередного функционального слоя и для подготовки поверхности пластины к последующим технологическим операциям);

2) ограниченное время межоперационного хранения партии пластин;

3) высокие требования к производственной гигиене.

Особенности сборочно-контрольных процессов

- Также характеризуются специфическими методами обработки и оборудованием;
- Имеет более тесную связь с процессами второй группы;
- Наиболее целесообразной формой организации процессов третьей группы является создание специализированных цехов или участков в пределах одного предприятия.

Конструктивно-технологические показатели структур ИС

1. Качество межэлементной изоляции, определяемое удельной емкостью (пФ/мкм^2);

2. Площадь, занимаемая типичным функциональным элементом ИС – вентилем;

3. Количество циклов легирования;

4. Количество циклов фотолитографии.

Сравнительные характеристики основных типов структур интегральных микросхем

Основные типы структур ИС	Емкость изоляции 10^{-4}, пФ/мкм²	Площадь на один вентиль, мм²	Число циклов легирования	Число циклов литографии
Диффузионно–планарная	2	0,025	3	5
Эпитаксиально–планарная без с/с	1,5	0,025	3	5
Эпитаксиально–планарная со с/с	1,5	0,02	4	6
С инжекционным питанием (И²Л)	1	0,003	3	5
С диэлектрической изоляцией	0,03	0,02	2	5
Изопланарная	0,2	0,02	2	5
Полипланарная	0,15	0,02	2	5
n–МДП	1,5	0,0036	2	5
p–МДП	1,5	0,0068	2	5
КМДП	1,5	0,012	3	6
КМДП–КНС	0,002	0,01	3	8

ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ – ОСНОВНОЙ СЫРЬЕВОЙ РЕСУРС МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И PV-ИНДУСТРИИ

Градация сырьевого кремния по чистоте

Градация кремния	Степень чистоты	Технология получения
Металлургический кремний **MG-Si**	2N – 4N 99% - 99,99%	Карботермическое восстановление
Кремний поликристаллический солнечного качества **SoG-Si**	6N – 8N 99,9999- 99,999999%	Химические технологии очистки MG-Si
Кремний поликристаллический электронного качества **EG-Si**	9N – 11N 99,9999999 - 99,999999999%	Химические процессы глубокой очистки MG-Si

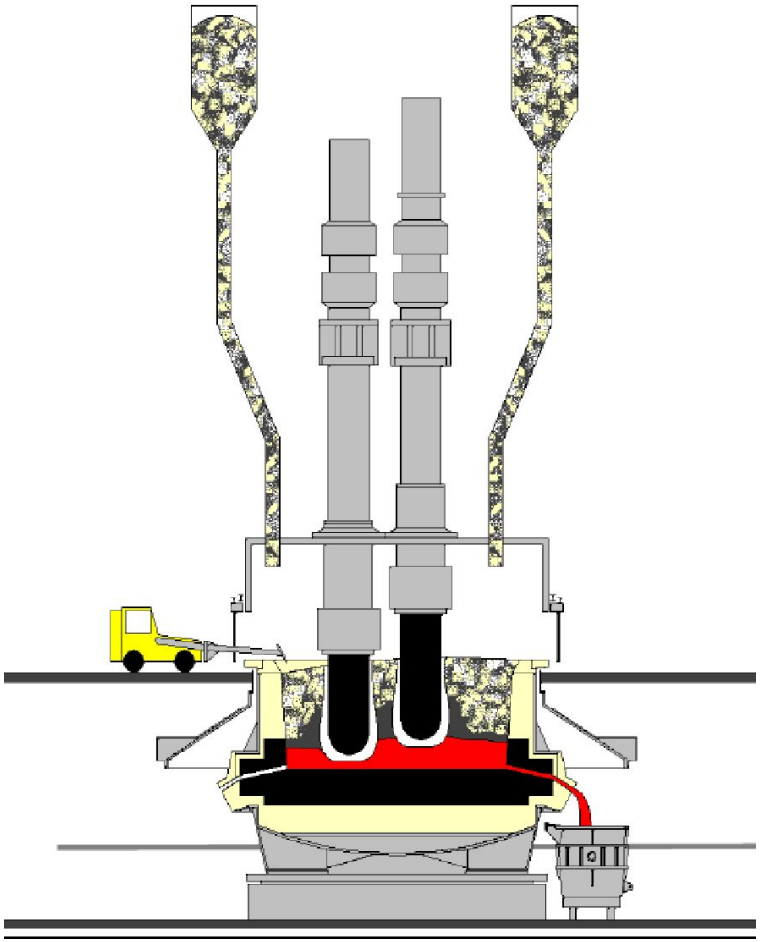
Производство и очистка металлургического кремния.

- Оксид кремния (SiO_2) является наиболее распространенным соединением в земной коре. Производство кремния начинается с оксида кремния. Источников оксида кремния обычно является либо кварцит (горная порода), либо обычный песок. В идеале, кварцит имеет низкое содержание железа, алюминия и других металлов. Кремний восстанавливают (лишают кислорода) с помощью реакции с углеродом (уголь, древесный уголь) при нагревании до 1500-2000 °C в специальных печах с угольными электродами.

$$SiO_2 + C \Rightarrow Si + CO_2$$

- В результате получается металлургический кремний (MG-Si). Чистота восстановленного таким образом кремния составляет 98%.

Устройство печи для карботермического восстановления кварцита



Silicon furnace

Мировое производство металлургического кремния

- Энергозатратность процесса получения металлургического кремния составляет около10кВтчас/кг. Типичная производительность печи: 10000 – 15000 тонн/год
- Эксперты оценивают мировое производство MG - кремния в 1,7-1,9 млн. т/год. Около 60% этого кремния используется для алюминиевой индустрии, 30% - для производства силиконов, 15% - в производстве стали и примерно 5% -для полупроводниковой промышленности, рисунок 86.
- Для изготовления 1 т поликристаллического кремния высокой чистоты в среднем необходимо 1,3-2 т MG - кремния.

Потребление металлургического кремния и типичные концентрации примесей в нем

Total production ~ 900 000 tonnes/p.a.

Element	Concentration (ppma)
Al	1200-4000
B	37-45
P	27-30
Ca	590
Cr	50-140
Cu	24-90
Fe	1600-3000
Mn	70-80
Mo	<10
Ni	40-80
Ti	150-200
V	100-200
Zr	30

Улучшенный металлургический кремний

- Попытки очистить металлургический кремний от примесей в жидкой или твердой фазах методами нагрева до сверхвысоких температур, обработкой шлаков, использованием присадок-восстановителей, методами сегрегации и выщелачивания с целью получения кремния солнечной градации успехов не имели.
- Получаемый, так называемый, « улучшенный металлургический кремний» имеет максимальную чистоту не выше 5N(99,999%) и является непригодным для изготовления коммерческих солнечных элементов

Химические технологии производства сверхчистого поликристаллического кремния

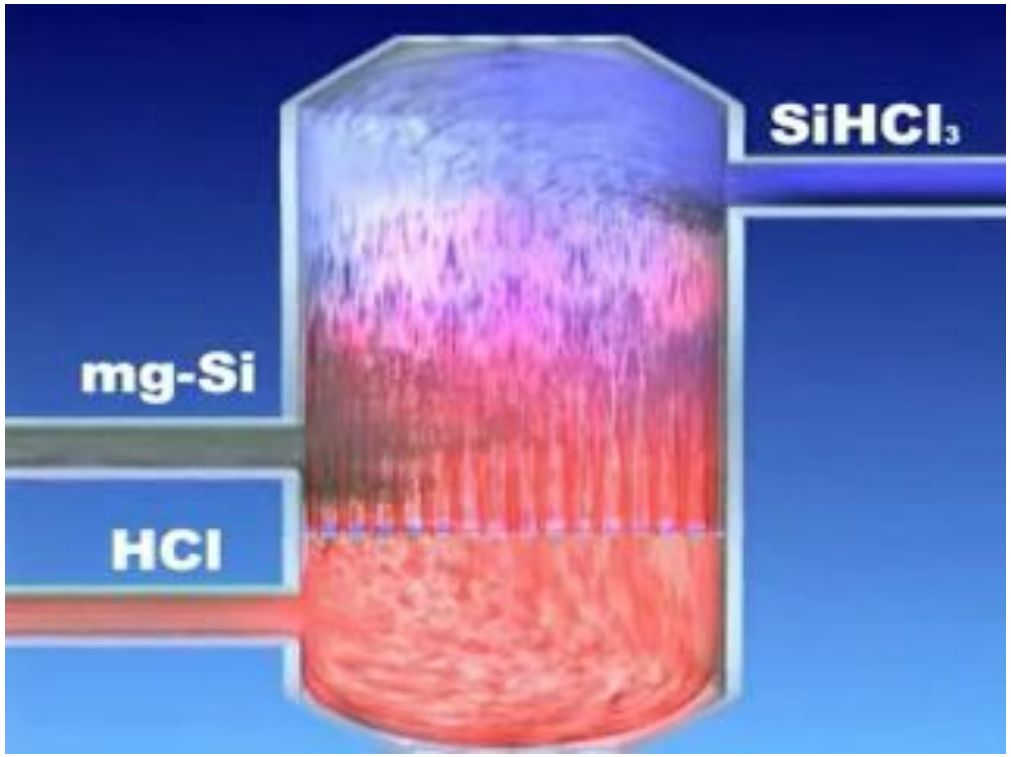
$SiCl_4$, H_2

Процесс ф. Siemens

- Измельченный в порошок металлургический кремний в реакторе кипящего слоя реагирует с безводным хлористым водородом при 300 °С и получают трихлорсилан $SiHCl_3$.
- **$Si + 3HCl \rightarrow SiHCl_3 + H_2$**
- В ходе этой реакции такие примеси, как Fe, Al, и B, образуют свои галоидные соединения ($FeCl_3$, $AlCl_3$, и BCl_3). Низкая температура кипения $SiHCl_3$, составляющая 31.8 °С, используется для его дистилляции из галоидов примесей. В полученном таким образом $SiHCl_3$ концентрация электрически активных примесей, таких как Al, P, B, Fe, Cu или Au, составляет меньше 1 атома примеси на миллиард атомов кремния в трихлорсилане.
- Затем очищенный $SiHCl_3$ реагирует с водородом при 1100 °С в течение 200-300 часов с образованием ультрачистого кремния.
- **$SiHCl_3 + H_2 \rightarrow Si + 3HCl$**
- Эта реакция протекает в больших камерах, где кремний осаждается в виде поликристаллических (с маленьким размером зерна монокристалла) стержней диаметром 150-200 мм. рисунок 89.

Синтез трихлорсилана

1. Измельчение металлургического кремния;
2. Обработка в парах соляной кислоты при температуре 300°С;



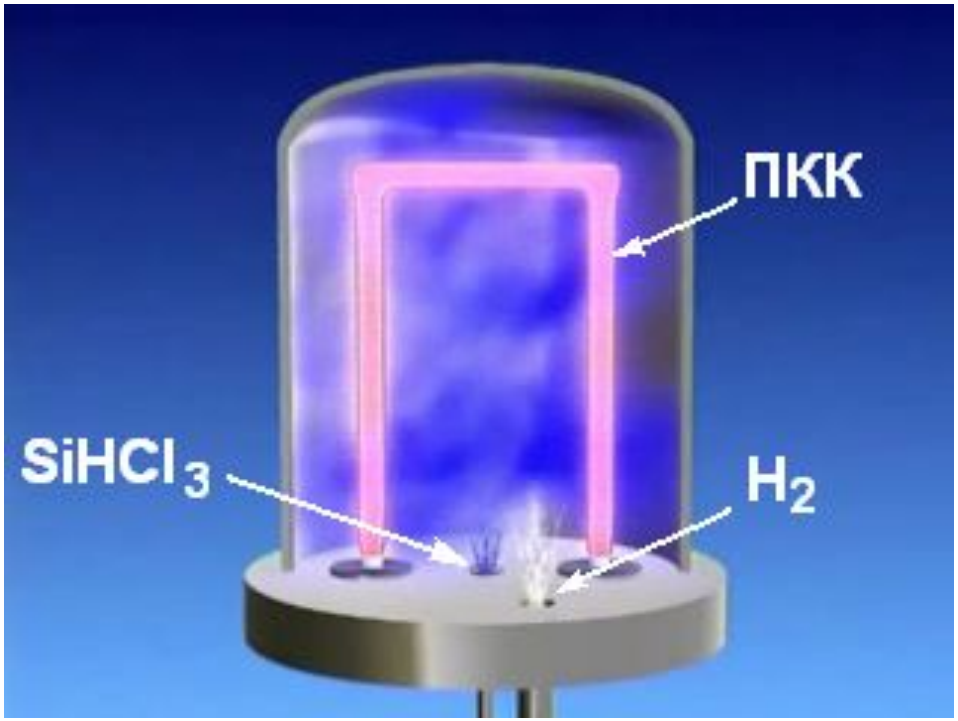
$$Si_{тв} + 3HCl_{газ} \longrightarrow SiHCl_{3\,газ} + H_{2\,газ}$$

3. Конденсация и фракционная дистилляция $SiHCl_3$

Получение электронного кремния

Осуществляется осаждением из парогазовой смеси трихлорсилана и водорода при температуре 1200 °С:

$$2SiHCl_{3_{газ}} + 3H_{2_{газ}} \longrightarrow 2Si_{тв} + 6HCl_{газ}.$$



Вид стержней поликристаллического кремния

- Полученные стержни поликремния затем разбиваются, становясь сырьем для последующего процесса кристаллизации. Производство поликристаллического кремния требует затрат большого количества энергии (около 250 кВт ч/кг).

Процесс ф. Dou Corning

Высокая стоимость метода Siemens связана в основном с большим потреблением энергии во время восстановления трихлорсилана (ТХС). Фирма Hemlock по методу Dou Corning использует вместо ТХС дихлорсилан (ДХС), который является материалом, позволяющим использовать меньше энергии при восстановлении и обеспечивающим более высокую производительность.

- Сущность процесса заключается в диспропорционировании трихлорсилана до дихлорсилана и термическом разложении последнего с осаждением поликремния на стержнях-подложках. Суммарные уравнения реакций, протекающих в этом процессе, имеют следующий вид:
- $\mathbf{2SiHCl_3 \rightarrow SiH_2Cl_2 + SiCl_4}$
- $\mathbf{SiH_2Cl_2 \rightarrow Si + 2HCl}$
- Степень конверсии до кремния для дихлорсилана выше, чем для трихлорсилана, поэтому требуется меньшее количество ДХС. Кроме того, одних и тех же производственных мощностей достаточно как для обычной дистилляции ТХС, так и для дополнительной операции очистки ДХС до высокой степени чистоты (как для полупроводникового кремния). Температура кипения ДХС достаточно низкая (8,2^{o}С), следовательно колонны дистилляции для очистки должны быть очень эффективными.

Процесс ф. Union Carbide получения поликристаллического кремния из моносилана

- При получении трихлорсилана (ТХС) используются две основные химические реакции:
- **$3\ SiCl_4 + Si + 2\ H_2 = 4\ SiHCl_3$**
- **$SiCl_4 + Si + 2\ HCl = 2\ SiHCl_3$**
- Степень конверсии четыреххлористого кремния в трихлорсилан 18 – 30 % .
- Процесс диспропорционирования ТХС до моносилана состоит из двух обратимых реакций:
- **$2SiHCl_3 \Leftrightarrow SiH_2Cl_2 + SiCl_4$**
- **$SiH_2Cl_2 \Leftrightarrow SiH_4 + 2\ SiHCl_3$**
- Это слабо экзо- и эндотермические процессы, в зависимости от направления реакции.
- Реакция разложения моносилана:
- **$SiH_4 + H_2 = Si + 3H_2$**
- яляется слабо экзотермической ΔH_p (750 °С) = - 10 кДж/моль
- Реактор кипящего слоя для осаждения кремния из моносилана работает при умеренной температуре (750°С), меньшей, чем реактор с трихлорсиланом (1100 °С).

Моносилановый процесс получения поликристаллического кремния ф. Ethyl Co. из отходов производства фосфорных удобрений

- При производстве фосфорных удобрений образуются крупнотоннажные отходы тетрафторида кремния SiF_4.
- Для получения моносилана используют раствор натрий-алюминий-гидрида собственного производства в сольвенте и покупной тетрафторид кремния – побочный продукт переработки фосфатов в фосфорные удобрения.
- $\mathbf{SiF_4 + NaAlH_4 = SiH_4 + NaAlF_4}$. Продукт реакции - моносилан, не содержащий тетрафторида кремния, направляют в реактор кипящего слоя, где происходит разложение моносилана.

Гранулированный поликристаллический кремний

[redacted]

Диагностика поликристаллического кремния

Что контролируется	Допуск	Метод контроля	На соответствие документа
1.. Содержание металлов: **Fe,Cr,Cu,Ni,Ti,Zn,Na**	≤50 ppbw	Экстракция металлов из поликремния травлением в кислоте и анализ их содержания методом атомно-абсорбционной спектроскопии	**ASTM F1724-01** **ICP-MS**
2. Содержание бора	≤ 300 ppta	Метод фотолюминисценции после модификации поликремния в монокристалл	**ASTM F1389-00**
3. Содержание фосфора	≤ 300 ppta	Метод фотолюминисценции после модификации поликремния в монокристалл	**ASTM F1389-00**
4. Содержание углерода	**≤ 250 ppba**	**Метод ИК-спектроскопии после модификации поликремния в монокристалл**	**ASTM F1391-93(2000)**

Параметры полупроводника

Самыми важными параметрами полупроводникового материала, определяющие работу солнечного элемента являются:

- ширина запрещенной зоны
- число свободных носителей заряда, обеспечивающих проводимость
- генерация и рекомбинация свободных зарядов под действием света, падающего на полупроводник