

## СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЛОК - СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

*Клычбаев Турсунбек Баевич*, к.т.н., соискатель, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66

*Исраилова Нелла Амантаевна*, к.т.н., доцент, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: [inela.kstu@gmail.com](mailto:inela.kstu@gmail.com)

*Алымкулов Салмор Аманович*, д.т.н., профессор, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: [salmor55@mail.ru](mailto:salmor55@mail.ru)

*Жумалиев Кубанычбек Мырзабекович*, д.т.н., профессор, академик НАН КР, e-mail: [jkm56@mail.ru](mailto:jkm56@mail.ru)

**Аннотация:** В данной статье рассмотрены усовершенствованные основные технологические процессы при производстве кремниевой продукции, которые ранее не входили в состав технологических блок–схем. Техническим результатом современной технологической блок – схемы является возможность выбора совокупности современных

переделов и технологических процессов при производстве кремниевой продукции с использованием связи между технологическими процессами, признаков для внедрения отдельных направлений производства, а также обеспечения экспрессивности, достоверности и избирательности для каждой продукции, содержащих в составе кремниевых материалов.

Большое внимание уделены технологиям производства современных функционально законченных приборов, структур и модулей. Кроме того в блок – схеме заблаговременно указаны основные производственные материалы и технологические элементы для полноценного функционирования производственных циклов.

**Ключевые слова:** Кварциты, пиролиз, гидрирование, рецикл, эпитаксия, легирование, тетрахлорид, мультикристаллический, поликристаллический, монокристаллический, трихлорсилан, ректификация, конденсация, рецикл, кварцевые тигли, диффузия, имплантация, фотошаблоны, голография.

### MODERN TECHNOLOGICAL BLOCK – DIAGRAM SILICON PRODUCTS PRODUCTION

*Klychbaev Tursunbek Baevich*, Ph.D., applicant, KSTU. I.Razzakov. Kyrgyzstan, Bishkek, Aitmatov Ch. T., 66

*Israilova Nella Amantaevna*, Ph.D., Associate Professor, KSTU. I.Razzakov. Kyrgyzstan, Bishkek, Aitmatov Ch. T., 66, e-mail: [inela.kstu@gmail.com](mailto:inela.kstu@gmail.com)

*Alymkulov Salmor Amanovich*, Doctor of Technical Sciences, Professor, KSTU. I.Razzakov, Kyrgyzstan, Bishkek, Aitmatov Ave. Ch.T., 66, e-mail: [salmor55@mail.ru](mailto:salmor55@mail.ru).

*Zhumaliev K.M.*, d.t.s., professor, academician NAS KR, e-mail: [jkm56@mail.ru](mailto:jkm56@mail.ru).

**Annotation.** This article reviews the improved basic technological processes in the production of silicon products, which were not previously included in the technological block diagram. The technical result of a modern xztechnological block diagram is the possibility of choosing a set of modern redistributions and technological processes in the production of silicon products using the connection between technological processes, signs for the implementation of individual production areas, as well as ensuring expressiveness, reliability selectivity for each product containing silicon materials.

Much attention is paid to technologies for the production of modern functionally complete devices, structures and modules. In addition, in the block diagram, the main production materials and technological elements for the full functioning of production cycles are indicated in advance.

**Key words:** Quartzites, pyrolysis, hydrogenation, recycle, epitaxy, alloying, tetrachloride, multicrystalline, polycrystalline, single-crystal, trichlorosilane, rectification, condensation, recycle, quartz crucibles, diffusion, implantation, photomasks, holography.

Среди всех высокотехнологичных и наукоемких отраслей производства, в течение длительного времени, производство кремниевой продукции, занимает лидирующее положение и считается базовой отраслью для производства широкого спектра дискретных интегральных полупроводниковых приборов и солнечных модулей. Производство кремниевой продукции является не только отдельной отраслью экономики, а комплексное сочетание элементов добывающего, металлургического, химического, электронного, электротехнического отраслей.

Из-за постоянного совершенствования инновационных процессов и применения новых технологических методов, становится ясно, что необходимо разработать совершенно новую, современную технологическую схему производства кремниевой продукции. При производстве кремниевой продукции следует особо учесть, что каждый последующий

передел является отдельной индустрией с отдельными рынками сбыта и стабильными признаками роста. Кроме того, инновационные влияния оказывают на всех технологических переделах, включая от металлургического кремния, включительно информационно – силовых приборов.

Далее мы рассмотрим краткое описание технологических переделов при производстве кремниевой продукции, согласно приложенной современной технологической блок–схеме.

### **1. Добыча и обогащение кварцевого сырья.**

Основной технологический цикл, включает в себя добычу и подготовку кварцитов высокой чистоты, их дробление и обогащение. Определяющим условием кварцевого сырья являются чистота кварцитов, его запасы. В первую очередь, это относится к обогащению особо чистого кварца – природного сырья, позволяющего по своим физико-химическим свойствам получить в процессе обогащения кварциты, относящихся к классу сверхчистых веществ. При этом предполагается использовать известные и новые научные методы и подходы в реализации технологии обогащения, связанные с получением сырья требуемого качества.

По результатам предварительных геологоразведочных работ и лабораторных исследований, определяют сложности освоения месторождений кварцевого сырья с условиями их залегания в местах и составом несколько тесно перемещающихся типов и сортов руды. При организации горных работ в зависимости категоричности минерального сырья используют селективную добычу руды, ограничивая буровзрывные работы путем их замены на без взрывные способы добычи. Проблемы освоения месторождений кварцевого сырья и рудопроявлений вполне разрешимы при наличии горнодобывающих и рудообогатительных комплексов, способных работать с минимальными затратами на капитальное строительство и эксплуатацию. При этом немаловажную роль играет возможность эффективного ведения горных работ на месте залежи сырья, что дает интеграцию процесса добычи и обогащения. Горно-обогатительный комплекс, включает в себя следующие процессы:

- подготовительные работы на месте залежи кварцевого сырья;
- ведение горно-добычных работ;
- переработка и первичное обогащение сырья;
- окончательное обогащение и подготовка шихты к карботермическому

восстановлению.

Механическое обогащение кварцевого сырья выполняется в три стадии чередованием селективной флотации примесных минералов с магнитной сепарацией на полиградиентных магнитных сепараторах. В последние годы особое внимание исследователей привлекает технологическая схема обогащения кварцевого сырья, включающая следующие операции:

- двухстадийное дробление;
- классификация на фракции;
- электромагнитная сепарация;
- флотация и сушка;
- погрузка готовой продукции.

Вышеуказанная технологическая схема обеспечивает более полное извлечение полезных минералов, повышает качество концентрата и экологическую чистоту производства.

### **2. Производство технического кремния.**

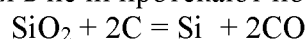
Технический кремний традиционно производится карботермическим способом в открытых или полузакрытых электродуговых печах. При производстве технического кремния в качестве основного сырья используются высококремнистые кварциты, содержащие не менее 98% двуокиси кремния, а в качестве восстановителей используются древесный уголь, нефтяной кокс и древесная щепка. В технологической части для плавки применяется метод электрического нагрева, то есть в рудотермической печи основным термическим источником

служит электрическая энергия, а древесный уголь и другие восстановители участвуют в производстве технического кремния. Стандартное сырье как кварцит, древесный уголь, нефтяной кокс и другие компоненты подвергаются дроблению, сушке и брикетированию

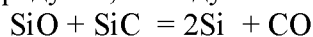
Плавка – непрерывное производство, где партиями подается основное сырье и восстановители, а слив технического кремния прерывной – в сутки сливается 6-9 раз. В целях увеличения электрического сопротивления шихты, улучшения проникновения воздуха в печную шихту, ускорения расплавления шихты, а также для предотвращения слипания шихты – на поверхности шихты производится операция разрыхления.

В процессе плавки, графитовый электрод непрерывно расходуется, поэтому следует периодически наращивать длину для восполнения расхода электрода. Сочетание используемых древесного угля, низкосолевого угля и нефтяного кокса или нефтесажи варьируется от спецификации производителя их роль в процессе - восстановления кремния из оксида посредством содержащегося в сырье углерода. Древесная щепка используется как наполнитель и разрыхлитель спекаемой массы для обеспечения необходимой циркуляции газов.

Химическая реакция в печи протекают по следующей форме:



Образовавшийся в процессе реакции монооксид углерода соединяется с воздухом и образует углекислый газ, являющийся одним из загрязнителей атмосферы. Однако кроме названных реакций в печи протекают и другие процессы – образование промежуточных соединений – углерода кремния и газообразного монооксида кремния. При повышении температуры до 1900 градусов, между ними также происходит реакция по получению чистого кремния:



Расплавленный кремний сливается через придонные отверстия печи и очищается пропускаемыми через расплав газами – азотом и кислородом. Эти газы окисляют содержащиеся в расплавленной массе частицы алюминия и кальция, окислы поднимаются в верхний слой полученной продукции. После того как полученная масса застынет, верхний слой, содержащий шлак, удаляется, и готовая продукция измельчается и расфасовывается в градациях, необходимых заказчику.

Для получения одной тонны технического кремния необходимо:

кварцит-2580 кг; древесный уголь-370 кг; низкосолевого угля-560 кг; нефтяной кокс-370 кг; древесная стружка-1320 кг; электроэнергия-13 мВт.

### **3. Производство поликристаллического кремния.**

Производство поликристаллического кремния является важнейшим звеном общей технологической блок-схемы, так как, именно этот материал служит основой высокодоходной мировой электронной промышленности. Сырьем для производства поликристаллического кремния является технический кремний соответствующей чистоты, в котором содержание примесей не превышает 1%. Процесс получения поликристаллического кремния осуществляется через сложные высокотехнологичные и наукоемкие технологии, в результате чего число производителей этого продукта ограничено.

Для получения поликристаллического кремния используется в основном циркуляционная «СИМЕНС»-технология, основанная на процессе водородного восстановления трихлорсилана, восстановления тетрахлорида кремния цинком и пиролиза моносилана. Достоинство этого процесса – легкость и экономичность получения трихлорсилана, эффективность очистки трихлорсилана, высокое извлечение и большая скорость осаждения кремния, и меньшая себестоимость продукции.

Трихлорсилан обычно получают путем гидрохлорирования кремния: взаимодействием технического кремния с хлористым водородом. Полученный трихлорсилан, содержит большое количество примесей, очистка от которых представляет сложную задачу. Наиболее эффективным методом очистки является ректификация, однако осуществить полную и глубокую очистку от примесей, имеющих различную физико-химическую природу,

применяя только ректификацию, сложно. В связи с этим для увеличения глубины очистки по ряду примесей применяются дополнительные меры.

Современная технологическая схема получения поликристаллического кремния включает в себя регенерацию и повторное использование всех компонентов и продуктов реакций восстановления, что улучшает технико-экономические показатели процесса, снижает себестоимость получаемого кремния, делает процесс экологически более чистым.

Технологический процесс получения кремния включает следующие основные переделы:

- синтез хлористого водорода;
- синтез трихлорсилана путем гидрирования измельченного кремния;
- «сухая» пыле очистка парогазовой смеси;
- «мокрая» очистка парогазовой смеси;
- конденсация хлорсиланов и регенерация парогазовой смеси;
- ректификационное разделение и очистка хлорсиланов;
- ректификационная очистка трихлорсиланов и тетрахлоридов;
- водородное восстановление трихлорсиланов;
- гидрирование тетрахлоридов до трихлорсилана;
- регенерация парогазовой смеси с возвращением водорода;
- очистка и разделение хлорсиланов;
- подготовка стержней – основ;
- переработка технологических отходов;
- контроль качества готовой продукции.

#### **4. Производство мульткристаллического кремния.**

Наибольшее распространение производства мульткристаллического кремния имеет метод, который проводится в среде инертного газа. В современных установках масса загрузки в тигель может составлять от 300..450 и до 800 кг. Расплавление кремния осуществляется в прямоугольных кварцевых тиглях с толщиной 30 мм. Внутренняя поверхность тиглей покрывается слоем нитрида кремния толщиной 300мкм. Кварцевый тигель используют на одну плавку. Покрытие нитридом кремния внутренней поверхности тигля позволяет на порядок снизить концентрацию металлических примесей в слитке мульткристаллического кремния и повысить в них время жизни неравновесных носителей заряда кристаллизующего расплава осуществляют с малой скоростью (0,25...0,33 мм/мин). При кристаллизации поверхность раздела твердой и жидкой фаз поддерживаются выпуклой в сторону расплава, чтобы избежать нежелательность кристаллизации от стенок тигля, а также образования пустот и раковин в объеме слитка. Процесс производят в проточной среде аргона. Выращенный слиток охлаждают в ростовой камере до температуры 570К и затем вместе с кварцевым тиглем, с использованием специальных захватных устройств, выгружают на воздух, где охлаждают до комнатной температуры. Поверхность слитка со всех сторон обрезают на 30мм, затем осуществляют раскрой слитка на блоки заданного сечения и резку блоков на пластины.

#### **5. Производство монокристаллического кремния.**

Производство монокристаллического кремния в основном (до 90% потребляемого электронной промышленностью) осуществляют методом Чохральского и в меньшей степени методом бестигельной зонной плавки. Идея метода получения монокристаллического кремния заключается в росте монокристалла за счет перехода атомов из жидкой или газообразной фазы вещества в твердую фазу на их границе раздела. Применительно к кремнию этот процесс может быть охарактеризован как однокомпонентная ростовая система «жидкость» – «твердое тело». Скорость роста определяется числом мест на поверхности растущего кристалла для присоединения атомов, поступающих из жидкой фазы, и особенностями переноса на границе раздела. Метод обеспечивает получение полупроводниковых материалов в форме совершенных монокристаллов с определенной

кристаллографической ориентацией.

Оборудование для выращивания монокристаллического кремния состоит из следующих основных блоков:

- печной агрегат, включающий в себя тигель, контейнер для поддержки тигля;
- нагреватель и источник питания;
- камера высокотемпературной зоны;
- механизма вытягивания кристалла, включающий в себя стержень с затравкой;
- устройства вращения и подъема тигля;
- вакуумного насоса.

Технологический процесс производства монокристаллического кремния происходит с того что, затравочный монокристалл высокого качества опускается в расплав кремния и одновременно вращается, в направлении противоположном вращению монокристалла, для осуществления перемешивания расплава и сведения к минимуму неоднородности распределения температуры. Получение расплавленного кремния происходит в тигле в инертной атмосфере (аргона при разрежении  $\sim 104$  Па) при температуре, незначительно превосходящей точку плавления кремния  $T = 1415$  градусов. Выращивание при разрежении позволяет частично очистить расплав кремния от летучих примесей порошка за счет их испарения, а также снизить образование на внутренней облицовке печи налета порошка монооксида кремния, попадание которого в расплав приводит к образованию дефектов в кристалле и может нарушить монокристаллический рост.

В начале процесса роста монокристалла часть затравочного монокристалла расплавляется для устранения в нем участков с повышенной плотностью механических напряжений и дефектами. Затем происходит постепенное вытягивание монокристалла из расплава. Для получения монокристаллов кремния методом Чохральского разработано и широко используется высокопроизводительное автоматизированное оборудование, обеспечивающее воспроизводимое получение без дислокационных монокристаллов диаметром более 300 мм. С увеличением загрузки и диаметра кристаллов стоимость их получения уменьшается. Однако в расплавах большой массы характер конвективных потоков усложняется, что создает дополнительные трудности для обеспечения требуемых свойств материала. Кроме того, при больших массах расплава снижение стоимости становится незначительным за счет высокой стоимости кварцевого тигля и уменьшения скорости выращивания кристаллов из-за трудности отвода скрытой теплоты кристаллизации. В связи с этим с целью дальнейшего повышения производительности процесса и для уменьшения объема расплава, из которого производится выращивание кристаллов, интенсивное развитие получили установки полунепрерывного выращивания. В таких установках производится дополнительная непрерывная или периодическая загрузка кремния в тигель без охлаждения печи, которой, в свою очередь, также может периодически или непрерывно подпитываться твердой фазой. Такое усовершенствование метода Чохральского позволяет снизить стоимость выращиваемых кристаллов на десятки процентов. Кроме того, при этом можно проводить выращивание из расплава небольшого и постоянного объема. Это облегчает регулирование и оптимизацию конвективных потоков в расплаве и устраняет сегрегационные неоднородности кристалла, обусловленные изменением объема расплава в процессе его роста.

Для получения монокристаллов  $n$  – или  $p$  – типа с требуемым удельным сопротивлением проводят соответствующее легирование исходного поликристаллического кремния и расплава. В загружаемый поликристаллический кремний вводят соответствующие элементы или их сплавы с кремнием, что повышает точность легирования.

#### **6. Производство пластин и подложек.**

После извлечения кремниевых слитков из установки выращивания монокристаллического кремния, заданной ориентации и толщиной, производят следующие технологические операции для получения пластин:

*а) механическая обработка:*

- отделение затравочной и хвостовой части слитка;
- обдирка боковой поверхности до нужной толщины;
- шлифовка одного или несколько базовых срезов;
- резка алмазными пилами слитка на пластины с ориентацией на несколько градусов, резка абразивом с помощью проволоки и ультразвуковая резка.

*б) травление:*

- на абразивном материале удаляются повреждения высотой более 10 мкм, затем в смеси плавиковой, азотной и уксусной кислот, приготовленной пропорции 1:4:3 или раствора щелочей натрия производится травление поверхности кремния.

*в) полирование:*

- получение зеркально гладкой поверхности с помощью полирующей суспензии с водой;
- в зависимости от характера воздействия полирующих веществ на поверхность пластины различают полирование механическое, химико-механическое и химическое.

В процессе обработки и подготовки поверхности кремниевых пластин необходимо создание совершенных поверхностей, имеющих высокую степень плоскопараллельности при заданной кристаллографической ориентации, с полным отсутствием нарушенного слоя, минимальной плотностью поверхностных дефектов, дислокаций.

**7. Производство фотоэлектрических преобразователей.**

Солнечные преобразователи позволяют преобразовывать световую энергию в постоянный ток. Солнечный свет является единственным ресурсом, потребляемым в процесс производства электроэнергии. Этот ресурс неистощим, бесплатен и всегда имеется в наличии в южных климатических зонах. Миллиарды фотонов солнечного света сталкиваются с атомами кремния, выбивая свободные отрицательно заряженные электроны из атомов и ионизируя их. Для выведения высвобожденных электронов из солнечных элементов необходимо создание внутреннего электростатического поля около передней поверхности солнечного элемента. Для этого в структуру кристаллического кремния «вживляются» другие элементы, создающие электрический дисбаланс, высвобождающий свободные электроны из солнечного элемента и направляющий их к заряжающему устройству. В результате этого процесса создается поток электрических зарядов, или то что называется электрическим током.

С самого начала, на рынке фотоэлектрических преобразователей доминирующими являлись технологии, основанные на использование кристаллического кремния (моно – и мульткристаллических пластин нарезанных из слитков высокоочищенного кремния). В настоящее время эти технологии составляют более 80 % всего рынка и вероятнее всего сохраняют доминантные позиции в течение следующего десятилетия. Фотоэлектрические преобразователи из пластин кристаллического кремния представляют собой традиционную технологию так называемого « первого поколения». «Второе поколение» преобразователей представлено тонкопленочными элементами. «Третьим поколением» называют различные новые и возникающие технологии, такие как комбинированные многослойные элементы.

Последовательность поколений абсолютно не означает превосходство одной технологии над другой.

▪ **Первое поколение.**

Последними направлениями развития солнечных преобразователей на основе кристаллического кремния являются увеличивающаяся доля рынка как для монокристаллических пластин с высокой эффективностью преобразования энергии, так и для мульткристаллических пластин: увеличивающееся использование нитридных антиотражающих покрытий для гидрогенизации последних. Многие монокристаллические и мульткристаллические пластины имеют структуру элемента изготовленного методом трафаретной печати. Одним из преимуществ его является то, что он использует те же самые

трафаретные печати, сушащие и обжигающие печи для замыкания контактов, что и разработанные для гибридной микроэлектроники. Другим преимуществом является простота обработки пластин.

В начале 80-х годов были разработаны и внедрены технологии изготовления солнечных преобразователей со скрытым контактом. Основным отличием технологии является использование лазера для формирования пазов в верхней поверхности через незначительный диффузионный слой и диэлектрическое покрытие. Покрытие места одновременно служит, как и антиотражающее покрытие. Преимуществом этого метода является то, что качество кремния на поверхности не меняется, позволяя полную отдачу голубым длинам волн. Также преимуществами являются сниженное затемнение верхней поверхности за счет более узких полосок и меньшее сопротивление потерь.

Альтернативой вышеуказанных высокоэффективных промышленных фотоэлектрических преобразователей является НТ- преобразователи, соединяющий оба кристаллический и аморфный кремний в одной структуре. Гидрогенизированный аморфный кремний имеет более высокую ширину запрещенной энергетической зоны, чем лежащий в основе кристаллический материал, формируя двойную поверхность с более высокой шириной запрещенной энергетической зоны. Так как удельная проводимость даже высоколегированного аморфного кремния низка благодаря низкой подвижности носителей заряда, прозрачные проводящие оксиды необходимы на обеих передней и задней поверхности для предоставления возможности доступа поперечных носителей к металлическим контактам отпечатанным на обеих поверхностях фотоэлектрического преобразователя.

Большинство фотоэлектрических преобразователей произведенных ранее использовали в своей основе мульткристаллические кремниевые пластины. Добавляя атомарный водород во время обработки плазмохимическим осаждением из паровой фазы нитрид – кремниевого антиотражающего покрытия, добивались высокого эффекта для уменьшения разброса выходного коэффициента полезного действия.

Фотоэлектрические преобразователи на основе кремниевых лент или листа избавляет от затрат по распиловке на пластины также как и обеспечивает меньшие расходы кремниевого материала. Наиболее распространенным методом производства ленточных кремниевых пластин является метод выращивания профильного кристалла методом Степанова или выращивание профилированных лент кремния методом вытягивания через фильеру.

▪ **Второе поколение - Тонкопленочные технологии.**

Наиболее обещающие тонкопленочные технологии в настоящее время, также являются полностью кремниевыми, используя преимущества аморфной, микрокристаллической и поликристаллической фаз. В настоящее время изготавливают солнечные элементы из аморфно - микрокристаллического тандема, которые имеют явные преимущества перед аморфными, кремниевыми-германиевыми гибридами. Другим технологическим развитием стало технологии однофазных, однопериодных тонкопленочных элементов из поликристаллического кремния на стекле, который похоже в состоянии конкурировать с модулями на кремниевых пластинах не только в сфере производственных затрат, но и производственных объемах и в длительности использования продукта.

Аморфно-микрокристаллические кремниевые тандемы основаны на осаждении аморфного кремния в водороде, который влияет на структуру осажденной пленки. Для взаимосвязанных тандем – элементов, ток в верхней поверхности элемента соответствует току с нижней поверхности.

Тонкопленочный поликристаллический кремний на стекле сочетает сильные стороны монолитного и тонкопленочного кремния. Сохраняя стабильность, длительность использования, распространенность монолитного кремния, эта технология получает основные преимущества тонкопленочных материалов, такие как намного сниженные затраты на материалы и монолитная конструкция большой площади. Антиотражающее покрытие и легированные кремниевые слои осаждены в ту же самую камеру на



текстурированное стекло на общую толщину до 1,5 микрон. Затем кремний кристаллизуется при высокой температуре для получения однофазного поликристаллического материала. Качество его достаточно для подвижности носителей заряда чтобы позволить хорошую поперечную проводимость.

▪ **Третье поколение.**

Для достижения большой эффективности была разработана трехслойная структура солнечного элемента, где элементы с различными ширинами запрещенной зоны сложены друг к другу. Верхняя поверхность, поглощающая голубые фотоны, использует сплав аморфного кремния с оптическим интервалом в  $\sim 1,8$  электронвольт для внутреннего слоя. Внутренний слой в середине элемента использует сплав аморфного кремния с германием. Оптический интервал в  $\sim 1,6$  электронвольт идеально подходит для поглощения зеленых фотонов. Нижний слой такого элемента поглощает красные и инфракрасные фотоны. В последнее время стали заменят нижние слои микрокристаллическим кремнием. Слои элементов связаны между высоколегированными слоями, формирующими связывание между прилегающими элементами. Эффективность такого элемента достаточно высока, однако его производство также высока.

**8. Производство эпитаксиальных, эпитаксиально–диффузионных, диффузионных и других структур.**

Для производства электронных компонентов используются полупроводниковые материалы, характеристики которых варьируются между физическими свойствами проводника и изолятора. Под полупроводником мы будем иметь в виду электронные устройства, чьи функции извлекаются от полупроводниковых свойств материалов. К полупроводникам можно отнести такие химические элементы как кремний, германий и арсенид – галлий. Проводимость электричества у полупроводника повышается при температуре, на свету или при добавлении примесей из-за увеличения количества проводимых валентных электронов полупроводника. Валентность или внешние электроны это носители электрического тока. В мире много веществ, которые проявляют полупроводниковые свойства, но самым используемым на сегодня материалом в устройствах, является кремний. Разновидность и применение этих устройств безмерно, здесь мы покажем основные и общие их виды, они разделяются на группы:

- МОП-структура (металл – оксид – полупроводник) - включает в себя микро-процессоры и другие управляющие устройства в чьи функции входит вычисления и управление информацией;

- Память на МОП-структурах – включает Динамическое ОЗУ, Статическое ОЗУ и различные виды ПЗУ, чьи функции входит хранение информации;

- Логический Узел – сюда входят такие устройства как специализированные интегральные схемы и системы на чипах, которые используются в специальных рынках электроники. Часто применяются в видео играх и в телекоммуникации;

- Аналоговые устройства – разработаны для обработки аналоговых сигналов. Часто применяются в секторе телекоммуникации и вычислительной сети;

- Оптоэлектроника – сюда входят устройства типа СИДа, полупроводниковые лазеры и приборы с зарядной связью.

Производство полупроводниковых устройств можно разделить на 3 фазы: дизайн, обработка пластин, сборка и т.д.

**- Дизайн.**

Дизайн включает в себя вычисление спецификации желаемого продукта и определение конфигурации схем для удовлетворения этих спецификации. Это часто включает в себя усложненные компьютерные моделирования.

**- Обработка пластин.**

Фаза обработки пластины состоит из укладывания узорчатых слоев кремния и металлов сверху кремниевых пластин, для того чтобы реализовать схему сети согласно дизайну.

Обработка пластин является очень сложным процессом и состоит из сотен процедур, включая механическую, тепловую, электронную, ионную, плазменную, лазерную и другие виды обработки, позволяющие в вакууме, контролируемой газовой среде, атмосфере целенаправленно изменять и задавать электрофизические параметры полупроводниковых, диэлектрических, резистивных, проводящих материалов и структур на их основе. В краткой форме рассмотрим методы легирования монокристаллических материалов, процессы диффузии, эпитаксии, ионной имплантации и т. д.

а). Легирование – введение в состав сплавов так называемой легирующих элементов для изменения строения сплавов, придания им определенных физических, химических или механических свойств. Легирование кремния осуществляется введением в расплав соответствующей примеси или лигатуры. При заданной температуре и времени выдержки в полупроводнике растворяется определенное количество примеси. Обычно донорные и акцепторные элементы в чистом виде не могут быть вплавлены в полупроводниковые кристаллы. Для этой цели применяют сплавы, содержащие легирующие элементы в определенной концентрации. Основными сплавами являются металлы: свинец, олово, индий, золото, серебро, алюминий и некоторые другие. Такие электродные сплавы используют для получения  $p - n$  переходов, омических контактов и соединений. Важным параметром легирования расплава полупроводников твердым веществом является чистота этого вещества. В этом случае даже небольшое количество в легирующем веществе посторонних примесей может привести к существенному загрязнению кристалла этими неконтролируемыми примесями. Однако окончательный выбор легирующей примеси определяется характером термообработки, которой будет подвергаться пластина из легированного полупроводника с нанесением на нее эпитаксиальным слоем. При длительной термообработке при повышенных температурах предпочтение отдается примесям, имеющим минимальный коэффициент диффузии в твердом состоянии, что обеспечивает минимальный переход легирующей примеси из пластины в эпитаксиальный слой.

б). Диффузия – процесс последовательного перемещения атомов примеси в кристаллической решетке, обусловленной тепловым движением. В полупроводниках существует два вида диффузии:

**1 вид: диффузия в кристалле**, находящемся в состоянии химического равновесия, то есть при однородном химическом составе и однородном распределении собственных дефектов – самодиффузия атомов растворителя;

**2 вид: диффузия в условиях**, когда система не находится в состоянии химического равновесия и градиенты химических потенциалов вызывают появление результирующих химических потоков.

Для изготовления  $p - n$  переходов используется химическая диффузия примесных атомов, которые вводятся в кристаллическую решетку для изменения ее электрофизических свойств. Перемещение примеси в решетке происходит посредством последовательных скачков, осуществляемых в трех направлениях. При диффузии примеси по вакансионному механизму вследствие того, что более подвижные носители заряда обгоняют ионы примеси, находящиеся в узлах решетки, и создают пространственный заряд, возникает электрическое поле, которое обуславливает появление силы, действующей на ион примеси, и появляется дрейфовая составляющая скорости.

в) Эпитаксия – ориентированный рост слоев, кристаллическая решетка которых повторяет структуру пластины. Стремление произвольной системы к минимуму свободной энергии приводит к тому, что в процессе эпитаксии растущие слои ориентируются с некоторым соответствием по отношению к соприкасающейся атомарной плоскости пластины. Существует несколько моделей, объясняющих характер сопряжений смежных атомных плоскостей двух веществ. Если параметры решетки веществ различаются несущественно, говорят о псевдоморфизме – результате приспособления межатомных расстояний наращиваемого кристалла к межатомным расстояниям пластины. Однако в

большинстве случаев наблюдаются скачкообразное изменение параметра решетки на границе раздела и появления дислокаций, понижающих возникающие механические напряжения. Пластина оказывает существенное влияние на процесс кристаллизации наращиваемого вещества. Атом, приходящий из внешней фазы, может передать ей свою кинетическую энергии. Силы связи между пластинами и адсорбированными атомами удерживают последние на поверхности; кристаллохимические особенности пластины влияют на скорость поверхностной диффузии адсорбированных атомов и тем самым на кристаллографическую ориентацию осаждаемой пленки. несовершенства строения поверхности пластины также сказываются на характере распределения и строения наращиваемого материала.

г) Ионная имплантация – процесс внедрения в твердотельную пластину ионизированных атомов с энергией достаточной для проникновения их в приповерхностные области пластины. Наиболее общим применением ионной имплантации является процесс ионного легирования материалов, так как технология ионной имплантации позволяет с высокой точностью управлять количеством легирующей примеси. Ионная имплантация характеризуется универсальностью и гибкостью процесса, что позволяет получать необходимые концентрации примеси в случаях, когда другие методы неприемлемы. Процесс ионной имплантации может осуществляться при низких температурах, благодаря чему сохраняются исходные электрофизические свойства кристаллов. При движении ионов в твердом теле внедряемые в пластину ионы меняют направление своего движения из-за столкновений с атомами мишени, которые могут покинуть свое первоначальное положение в узлах кристаллической решетки. В результате вдоль траектории внедренных ионов образуются многочисленные вакансии и междоузельные атомы. Возникают целые области, в которых нарушена кристаллическая решетка, вплоть до перехода монокристалла в аморфное состояние.

д) Фотошаблоны – плоскопараллельная пластина из прозрачного материала, на которой имеется рисунок, состоящий из сочетания непрозрачных и прозрачных для света определенной длины волн участков на основе пленочного покрытия, образующих топологию одного из слоев структуры прибора или группы приборов, многократно повторенных в пределах активного поля пластины. Фотошаблон является одним из основных инструментов при создании заданного рельефного защитного покрытия при проведении фотолитографии в планарной технологии. В зависимости от материала пленочного покрытия различают фотошаблоны на основе фотографической эмульсии, металлической пленки и других материалов, например окиси железа. При изготовлении фотошаблона наиболее распространен трехступенчатый метод, оканчивающийся изготовлением эталонного фотошаблона. В его основе лежат три процесса:

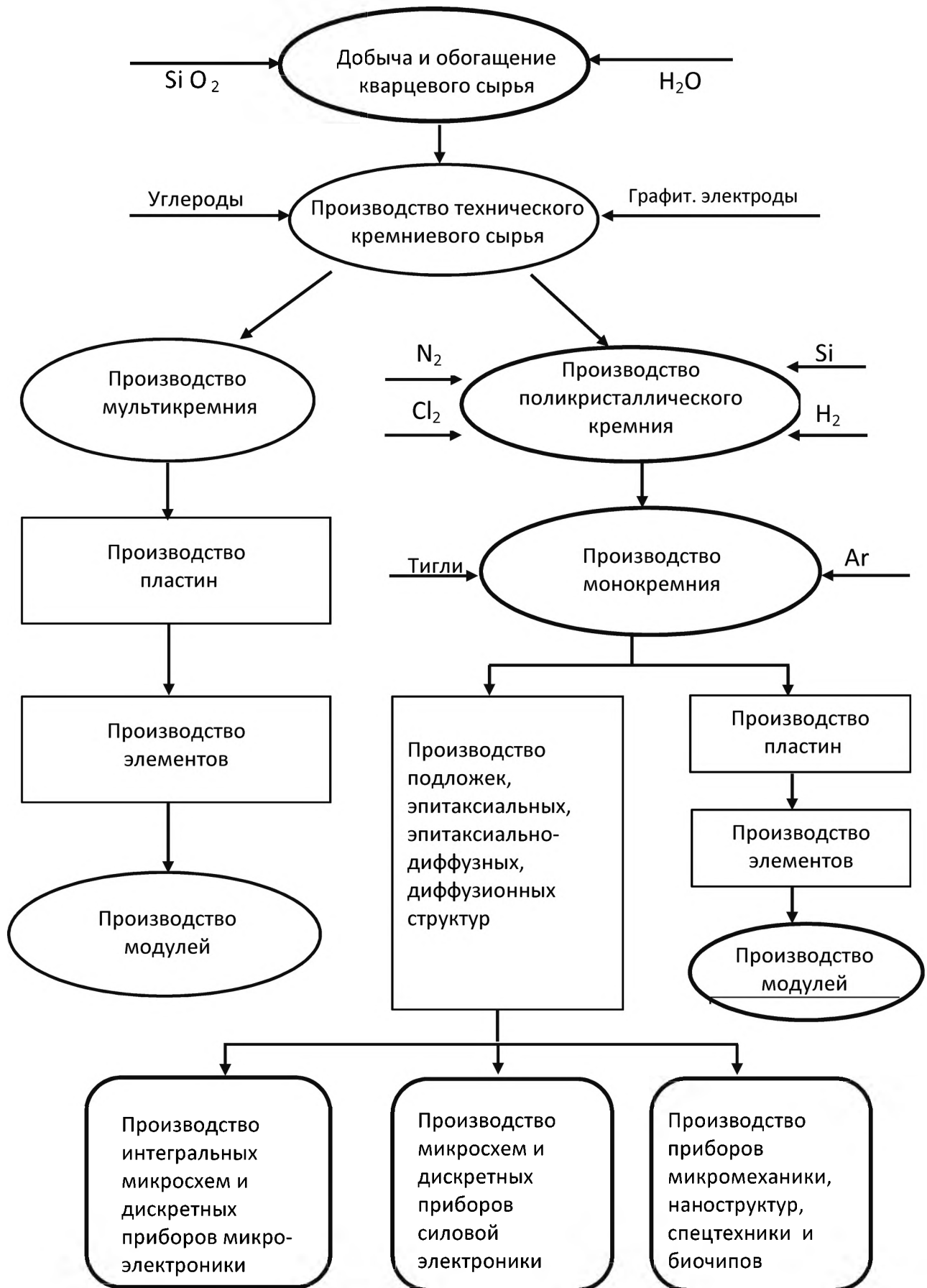
**Первый процесс** – изготовление оригинала. Оригинал представляет собой единичное увеличенное изображение модуля фотошаблона. Для изготовления оригиналов применяют установки – координатографы, позволяющие обеспечивать высокую точность вырезания.

**Второй процесс** – изготовление промежуточного оригинала или уменьшенной копии оригинала, выполненной на фотопластинах с высокой разрешающей способностью. Часто промежуточный оригинал хромируют или выполняют на цветных стеклах.

**Третий процесс** – мультиплицирование, которое осуществляется на фотоповторителях.

е) Литография – используется для получения контактных и прецизионных свободных масок. Литографические процессы формируют на поверхности слой стойкого к последующим технологическим воздействиям материала, способного под действием облучения определенной длины волны изменять необратимо свои свойства и прежде всего стойкость к проявителям. В технологии электронных устройств литографические процессы универсальны и наиболее часто повторяемы. В зависимости от длины волны применяемого излучения различают оптические (фотолитография), рентгеновскую, ионно-лучевую и голографическую литографию.

технологическая блок-схема  
производства кремниевой продукции



1. *Фотолитография* – это совокупность фотохимических процессов, в которых можно выделить три основных этапа: формирование на поверхности материала слоя фоторезиста; передача изображения с шаблона на этот слой; формирование конфигурации элементов устройств с помощью маски из фоторезиста. Основу образования рельефного изображения составляют:

- фотополимеризация и образование нерастворимых участков;
- сшивание линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений;
- фотолиз светочувствительных соединений с образованием растворимых веществ.

2. *Рентгеновская литография* – принципы контактной или бесконтактной печати при использовании для экспонирования низкоэнергетического рентгеновского излучения. Система рентгеновской литографии состоит из собственно рентгеновской установки для экспонирования, системы совмещения шаблона с пластинами и прецизионного шаблона. Лучи проходят через шаблон, задерживаются на одних участках и проходят через другие, проецируя изображение шаблона на пластине. В зависимости от производительности, размеров интегральных и типа систем совмещения, рентгеновская литография развивается по двум направлениям:

- использование излучения с длиной волны 0,4...1,3 нм. рентгеновских установок с вращающимся анодом, относительно простых систем совмещения, достаточно чувствительных негативных резистов, обеспечивающих разрешение 0,5 мкм. и требующих продолжительности экспонирования не более 1 мин для изготовления интегральных микросхем с размерами элементов 0,4...1 мкм;

- использование синхронного излучения с длиной волны 1...2,5 нм более сложных, чем в первом направлении, систем совмещения, менее чувствительных, но обладающих высокой разрешающей способностью, обеспечивающих изготовление многослойных структур.

3. *Ионно-лучевая литография* – метод получения структур с субмикрометровыми размерами элементов. Разрешающая способность ионной – лучевой литографии выше, чем электронной. Дифракционные ограничения практически отсутствуют, так как длина волны для ионов при сравнимых энергиях значительно меньше, чем для электронов и тем более фотонов. Для ионно-лучевой литографии не существует эффекта близости. Боковое рассеяние ионов при их проникновении в вещество незначительно, вторичные электроны имеют малую энергию и тормозятся на расстояниях, меньших сотой доли микрометра. Резисты обладают значительно большей чувствительностью к ионам, чем к электронам, так как удельные потери энергии ионов в десятки раз больше. Известны три типа ионных источников: дуоплазмотронный, жидкометаллический и газофазный с полевой ионизацией. Работа первого основана на извлечении из плазмы газового разряда, а второго и третьего – на явлении отрыва ионов жидкого металла или сорбированного газа с острия анода под действием сильного электрического поля. Наибольшей яркостью и наименьшим разбросом ионов по энергиям обладает газофазовый полевой источник. Несколько хуже свойства у жидкометаллического источника, но он прост, надежен в эксплуатации и наиболее пригоден для ионно-лучевой литографии. Ионно-лучевая литография развивается в трех направлениях: с использованием коллимированных управляемых ионных пучков, остросфокусированных ионных пучков и ионно-проекционных систем.

4. *Голографическая литография* – метод регистрации интерференционных картин с взаимодействием двух волн на поверхности или в объеме светочувствительного материала. Этот зарегистрированный интерференционный узор и есть голограмма. Если такую голограмму осветить опорной волной с фазой, сопряженной с фазой волны при записи, то восстановится предметная волна, также сопряженная с предметной волной при записи, то есть волна строящая действительное изображение объекта. Голография в проекционной литографии обеспечивает: высокую разрешающую способность на больших полях без использования сложных объектов; запись и восстановление с одной голограммы нескольких

изображений; голографическую передачу высококачественных изображений через поверхности низкого оптического качества; малую чувствительность голограмм к повреждениям и дефектам и возможность голографической оптической мультипликации с полной совмещаемостью изображений.

### **Литература**

1. Ржевский В.В. //Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М. Недра, 1980., 280с.
2. Кравец Б.Н. //Специальные и комбинированные методы обогащения. М. Недра, 1986, 304с.
3. Катков О.М.//Выплавка технического кремния. Иркутск, Изд. ИПУ, 1997, 243с.
4. Венгин С.И., Чистяков А.С.//Технический кремний, М. Металлургия, 1972,234с.
5. Сахаров Б.А. и др. // Металлургия и технология полупроводниковых материалов. М. Металлургия, 1972, 336с.
6. Арсеньев П.А.//Новые материалы в полупроводниковой электронике. М. Химия, 1988, 73с.
7. Фалькевич Э.С. //Технология полупроводникового кремния. М. Металлургия, 1992, 101с.
8. Березин А.С., Мочалкина О.Р. //Технология и конструирование интегральных микросхем. М. Радио и связь. 1983, 232с
9. Вавилов В.С.//Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах. М. Мир.1980,200с.
10. Курносоев А.Н. //Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. М. Высшая школа. 1980,327с.
11. Нашельский А.Я. Монокристаллы полупроводников. М. Металлургия. 1978, 91с.
12. Асанов А.А., Клычбаев Т.Б. //Технологические аспекты производства технического кремния. Бишкек. Техник. 2009, 214с.
13. Асанов А.А. , Клычбаев Т.Б.// Технология производства кристаллического кремния. Бишкек. 2012, 286с.