

Хлорирование в солевом расплаве в технологии производства поликристаллического кремния

В. Иванов¹

УДК 548.522:621.315.592 | ВАК 05.27.06

Решение проблемы рентабельности производства поликристаллического кремния является важнейшим фактором развития современной электроники. Для снижения себестоимости поликремния предлагается в качестве исходного сырья использовать материалы, содержащие диоксид кремния. Эти материалы подвергать хлорированию, а образующийся тетрахлорид кремния гидрировать до трихлорсилана, используемого при водородном восстановлении кремния. Литературные данные по хлорированию кремнезема показывают принципиальную возможность хлорирования SiO_2 в расплаве солей. Описаны технологические особенности данного процесса, параметры, влияющие на хлорирование диоксида кремния, применяющиеся в процессе сырьевые материалы. Определены удельные расходы основных сырьевых материалов и их стоимость в традиционной технологии производства поликремния, применявшейся в отечественной промышленности, и предлагаемой новой технологии.

Сделан вывод, что переход с традиционной на новую технологию производства поликристаллического кремния поможет значительно снизить затраты на сырье, что даст возможность решить задачу по созданию конкурентоспособного производства полупроводникового кремния.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отрасль полупроводникового кремния находится в сложных условиях, определенных, с одной стороны, необходимостью продолжения развития солнечной энергетики и электронной промышленности, на которой базируются информационные технологии, с другой стороны – последствиями мирового экономического кризиса 2008 года.

Ускоренное развитие фотовольтаики в начале века привело к резкому росту цены на поликристаллический кремний (ПКК), вследствие этого в 2008–2009 годах был реализован ряд проектов по повышению производительности действующих предприятий и строительству новых заводов. Мощность всех действующих производителей по состоянию на 2013–2014 годы составила 280 тыс. т ПКК [1]. Экономический кризис привел к значительному перепроизводству поликремния на мировом рынке, вслед за которым последовало резкое падение цен на этот материал: в 2014 году средние цены на ПКК составляли ~25 долл./кг, в 2015 году – ~15 долл./кг. Вследствие снижения рентабельности в 2011–2013 годах многие

компании перестали функционировать, а оставшиеся – снизили объемы производства. По мнению аналитиков, существующие мощности используются на 45–50% [1]. Единственный в России завод по производству поликремния, ООО «Усолье-Сибирский силикон», был закрыт.

Эксперты в области полупроводниковых материалов считают [2], что одним из путей успешного развития отрасли является снижение себестоимости производства поликристаллического кремния, являющегося базовым материалом для электроники и солнечной энергетики. Решение этой задачи возможно путем разработки технологий с пониженными производственными затратами и совершенствованием процессов, используемых для получения поликремния.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В настоящее время основная доля ПКК производится по технологической схеме Сименс-процесса [2, 3], включающей получение трихлорсилана (ТХС), его очистку и водородное восстановление в реакторах стержневого типа. Такая технологическая схема была реализована на Запорожском титано-магниево-комбинате [4]. Схема включала:

¹ ООО «Германий и приложения», v.m.ivanov@rambler.ru.

прямой синтез хлористого водорода; гидрохлорирование технического кремния; конденсацию хлорсиланов; выделение и очистку трихлорсилана, его водородное восстановление с получением поликремния; выделение из отходящей парогазовой смеси водорода и трихлорсилана, а также их рециклы на переделе водородного восстановления. При этом образовывался ряд сопутствующих продуктов, которые выводились из технологической схемы. Фактически эти продукты представляли собой безвозвратные потери, снижающие технико-экономические показатели производства, что вело к повышению себестоимости поликремния.

При синтезе трихлорсилана гидрохлорированием технического кремния, в реакторах с псевдоожиженным слоем образуется значительное количество мелкодисперсной (<0,1 мм) кремниевой пыли. Поскольку использовать эту кремниевую пыль в производстве ПКК в типовом реакторе гидрохлорирования невозможно, ее приходится захоранивать на полигоне промышленных отходов, что приводит к снижению выхода кремния в готовый продукт и к увеличению производственных расходов.

Особенностью Сименс-процесса является то, что в качестве побочного продукта образуется значительное количество тетрахлорида кремния (ТК) – до 15 т на 1 т ПКК. Для повышения рентабельности на производящих поликремний предприятиях используют различные варианты утилизации ТК. Его реализуют в качестве сырья для производства кварцевых изделий, оптического волокна, аэросила, так называемой белой сажи, кремнийорганических материалов. На передовых предприятиях применяют процесс гидрирования тетрахлорида кремния до трихлорсилана, позволяющий повысить извлечение кремния в готовую продукцию и снизить его безвозвратные потери. В промышленности применяются методы высокотемпературного гидрирования и каталитического гидрирования, причем последний имеет значительно меньшую энергоемкость и рассматривается как наиболее перспективный метод, что учитывается при проектировании и строительстве новых предприятий [5].

Анализ производственных затрат показал, что значительную долю в себестоимости ТХС (до 74%) занимают сырьевые материалы: технический кремний, водород, хлор. В стоимости сырьевых материалов доля технического кремния составляет 75%, что объясняется его высокой ценой. Технический кремний получают карботермическим восстановлением кварцитов в дуговой электрической печи при температуре свыше 2000 °С. Данный процесс связан с высокими технологическими и энергетическими затратами, в том числе на производство восстановительных материалов и на приготовление шихты, когда все исходные материалы дробят, а мелкую фракцию отбрасывают. Кроме того, во время выплавки кремния происходит выделение различных газов и мелкой

пыли компонентов шихты. Вследствие этого в настоящее время на мировом рынке цена технического кремния составляет 2210 долл. за т. На рынке России эта цена доходит до 240 000 руб./т.

В настоящее время в научно-технической литературе [2, 6, 7] предлагается вместо технического кремния в качестве сырьевого материала использовать специально подготовленный кварцевый песок и техногенные отходы абразивной и электродной промышленности, содержащие диоксид и карбид кремния. В процессе производства эти материалы предлагается смешивать с восстановителем, затем осуществлять высокоэнергетическую обработку смеси, после чего подвергать прямому хлорированию в шахтном хлораторе. Образующийся тетрахлорид кремния конвертировать низкотемпературным гидрированием в трихлорсилан, который используется для получения ПКК водородным восстановлением. Специальная процедура улавливания водой хлористого водорода на выходе реакторов водородного восстановления с использованием автоматизированного автономного модуля разложения соляной кислоты на хлор и водород позволяют снизить производственные затраты. В новой технологической схеме сохраняется принцип замкнутости по хлору, водороду, воде, хлористому водороду. Оценки экономической эффективности новой технологии определяются возможностью снижения себестоимости поликристаллического кремния до 12...10 долл. за кг.

Ранее в литературе отмечалось [8], что для промышленного производства тетрахлорида кремния природное окисное сырье не нашло широкого применения, несмотря на многочисленные исследования в этом направлении. Были проведены работы [9] по изучению влияния температуры и химической активности на скорость хлорирования и степень извлечения SiO_2 из различных кремнеземов. В присутствии угля температура начала хлорирования аморфного кремнезема – 730–740 °С, кварца – 1220 °С. Степень хлорирования в смеси с углем (1:1) при 1100–1150 °С в течение 1 ч составляет для песка 1,62%, плавленого кварца 15,2%, аморфного кремнезема 40,56%. Реакция аморфного SiO_2 с хлором в присутствии угля в интервале 850–1000 °С замедляется, а затем снова резко ускоряется, что объясняется превращением аморфной кремниевой кислоты в кристобалит. Установлена также зависимость между плотностью кремнезема и степенью его хлорируемости.

Из всех видов природного сырья наибольший интерес для производства тетрахлорида кремния представляют диатомит и трепел, так как они являются аморфной разновидностью кремнезема и обладают хорошо развитой поверхностью.

Предложен [10] способ получения четыреххлористого кремния в расплаве хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов. Способ позволяет проводить процесс

хлорирования при температуре 700–800 °С. Смесь молотых диатомита и древесного угля в соотношении 1,7:1 хлорируют в течение 5 ч. Реакционные газы охлаждают до минус 20–22 °С, получая сырьевой SiCl₄. О выходе кремния в продукт авторы не сообщают.

Установлено [8] вредное влияние на скорость хлорирования накапливающихся в расплаве хлоридов щелочноземельных металлов, в особенности хлоридов магния. При хлорировании диатомита в расплаве солей на установке производительностью 1 т / сутки SiCl₄ наблюдался унос до 30% диатомита вследствие плохой смачиваемости его расплавом. При добавлении в расплав 5–10% хлористого алюминия унос диатомита уменьшается.

Авторы патента [11] хлорировали аморфный диоксид кремния в расплаве, применяя лабораторный реактор. В качестве сырья использовался остаток от выщелачивания серпентинита состава SiO₂ – 89,2 вес. %, H₂O – 6,7 вес. %, сумма MgO, FeO, Al₂O₃ ~4,1 вес. %, измельченный до крупности 0,08–0,12 мм. Материал в токе аргона прогревался в течение часа при температуре 650 °С, в результате чего содержание влаги было снижено до 1,48 вес.%. В качестве углеродного восстановителя применялся березовый уголь марки «А» крупностью 0,1–0,14 мм. Для приготовления расплава использовали хлориды калия и натрия, взятые в мольном соотношении 1:1. Данная смесь имеет температуру плавления 710 °С. При температуре процесса 850–900 °С расплав имеет хорошую подвижность, что поддерживает устойчивую работу ванны. Рабочая температура обеспечивалась нагревом электропроводящего соляного расплава при пропускании через него переменного тока. С этой целью реактор был оснащен электродами. Для обеспечения постоянной концентрации реагентов в расплаве в реактор мелкими порциями загружалась подготовленная шихта с весовым соотношением SiO₂:C = 1:0,27. Это позволило поддерживать содержание диоксида кремния в пределах 1–3%, углерода 3–5%. Хлор подавался с расходом, обеспечивающим максимальное использование хлора и хорошую циркуляцию расплава в ванне. Выходящая из реактора парогазовая смесь, содержащая SiCl₄, AlCl₃, FeCl₃, CO₂ и СО, поступала в аппараты улавливания хлоридов металлов, после чего тетрахлорид кремния конденсировался при температуре минус 35 °С. За 42 ч эксперимента было получено 5120 г тетрахлорида кремния. Извлечение кремния в продукт составило 94,5%. Слитое 7120 г расплава из реактора, о составе расплава не сообщается.

Эксперимент показал принципиальную возможность хлорирования аморфного диоксида кремния в расплаве. Следует отметить, что остаток от выщелачивания серпентинита получается при переработке промышленных отходов, которые локализованы в месте расположения предприятия. Для разработки новой технологии производства

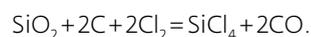
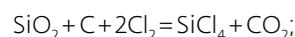
поликристаллического кремния целесообразно использовать более широкий ряд сырьевых материалов, содержащих диоксид кремния, таких как кварциты, кварцевый песок или другие природные материалы.

Информации о проводимых за рубежом исследованиях по хлорированию кремнезема в расплаве солей у автора нет. В период бурного развития солнечной энергетики, когда цена на поликремний доходила до 400 долл./кг [12], производители поликристаллического кремния активно наращивали мощности производств, а инвесторы вкладывали средства в строительство новых предприятий. Поскольку Сименс-процесс был наиболее изученным и освоенным способом промышленного производства ПКК, новые заводы запускались с использованием этого способа. В результате, в настоящее время 88% поликремния в мире производится по методу Сименс-процесса [12].

В условиях перепроизводства ПКК и его низкой цены на мировом рынке развивать новые способы получения поликремния зарубежные инвесторы, по-видимому, считают преждевременным.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХЛОРИРОВАНИЯ В СОЛЕВОМ РАСПЛАВЕ

На примере из практики современной промышленности предлагается рассмотреть технологические особенности процесса хлорирования в солевом расплаве. Известно, что в производстве губчатого титана [13], при рудотермической электроплавке ильменитового концентрата, в титановый шлак попадает некоторое количество диоксида кремния. Соответственно, при хлорировании титанового шлака вместе с диоксидом титана хлорируется и диоксид кремния с образованием тетрахлорида кремния по реакциям:



В настоящее время в титановой промышленности широкое распространение получил метод хлорирования измельченной шихты в расплаве хлоридов щелочных металлов. Метод обладает следующими преимуществами:

- интенсивный барботаж вводимого хлора обеспечивает эффективный тепло- и массообмен, высокую удельную производительность;
- подачей хлора и отводом избыточного тепла возможно обеспечить терморегулирование процесса;
- при организации процесса предъявляются менее жесткие требования к сырью по содержанию примесей алюминия, железа, кальция;
- поскольку значительная часть хлоридов примесей растворяется в расплаве, выходящий из хлоратора

целевой продукт меньше загрязняется примесями алюминия, железа, кальция, что облегчает его последующую очистку;

- процесс хлорирования в расплаве идет преимущественно с образованием CO_2 , это исключает образование взрывоопасных газовых смесей, что упрощает условия эксплуатации оборудования.

Схематичное изображение реактора для процесса хлорирования металлосодержащего сырья в солевом расплаве представлено на рис. 1.

При хлорировании в расплаве солей, частицы шихты находятся во взвешенном состоянии равномерно по всему объему расплава. Подаваемый в нижнюю зону расплава под углом к подине при давлении ~170 кПа хлор диспергируется на мелкие пузырьки, которые собираются на поверхности углерода, и затем взаимодействует с оксидами, что способствует непрерывному барботажу расплава. Выделяющийся углекислый газ усиливает барботаж. Уровень расплава в хлораторе должен быть таким, чтобы хлор полностью прореагировал в объеме расплава.

Непрерывный отвод избыточного тепла, периодический вывод с отработанным расплавом примесей и непрохлорированных компонентов позволяют интенсифицировать процесс и обеспечить непрерывную и равномерную работу хлоратора.

ХЛОРИРОВАНИЕ КРЕМНЕЗЕМА И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЦЕСС

Практика производства тетрахлорида титана хлорированием в расплаве показывает, что метод является пригодным для получения тетрахлорида кремния из оксидов кремния. При этом следует учитывать, что оксиды металлов имеют разную склонность к хлорированию: по этому признаку их можно расположить в следующий ряд [13]:



Из этого ряда следует, что присутствующие в сырьевых материалах примеси будут хлорироваться и переходить в расплав. Некоторые из примесей играют активную роль в процессе хлорирования кремнезема, что следует учитывать при выборе исходных материалов для производства тетрахлорида кремния.

Для процесса хлорирования важна роль восстановителя, в качестве которого применяется пековый кокс. Согласно существующей теории [13], в процессе хлорирования оксидов углерод выполняет каталитическую и восстановительную функции. На первом этапе углерод сорбирует на своей поверхности хлор, при этом молекулы хлора диссоциируют на атомы:

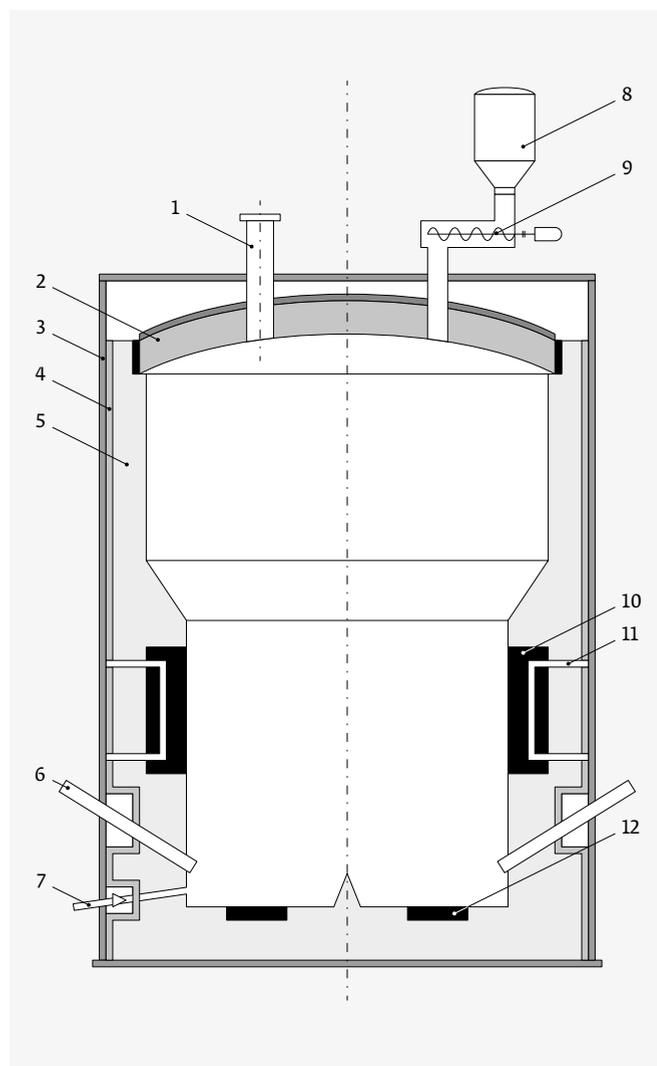
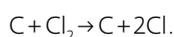
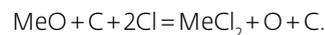


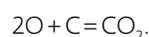
Рис. 1. Схема солевого хлоратора: 1 - газоход, 2 - свод, 3 - кожух, 4 - графито-антраценовый слой, 5 - шамотная футеровка, 6 - фурма, 7 - нижний слив расплава, 8 - шихтовый бункер, 9 - шнековый питатель, 10 - графитовый электрод, 11 - водоохлаждаемая штанга, 12 - донные графитовые электроды

На втором этапе углерод выполняет роль транспортера хлора и катализатора. Химически более активный хлор вступает во взаимодействие с окислом металла:



При этом в результате реакции атомарного хлора с оксидом металла образуется атомарный кислород.

На третьем этапе углерод выполняет роль восстановителя – восстанавливает кислород с образованием, в основном, двуокси углерода:



При производстве технического кремния в качестве восстановителя используется древесный уголь, который имеет высокие реакционную способность, УЭС и пористость – важные качества при рудовосстановительной плавке кремния. Однако при хлорировании кремнезема в расплаве солей эти качества не имеют столь большого значения, тем более, что по литературным данным [14] 77,4% фосфора и 51,9% бора в технический кремний попадают именно из древесного угля. Поскольку фосфор и бор трудно отделяются от кремнийсодержащих материалов при химической и металлургической очистке, то их уменьшение в сырьевых материалах приведет к повышению качества ПКК.

При хлорировании в расплаве большее значение имеют физические свойства углерода: плотность и смачиваемость расплавом. Необходимыми свойствами обладают нефтяной и пековый коксы, имеющие незначительное содержание фосфора. Согласно имеющимся данным [8], качество пекового кокса значительно выше качества нефтяного кокса. Поэтому при хлорировании кремнийсодержащего сырья в качестве углеродистого восстановителя целесообразно использовать пековый кокс.

Содержание углерода в расплаве должно быть в интервале 2–5%. При его содержании меньше 2% процесс хлорирования ухудшается из-за дефицита восстановителя. При содержании кокса более 5% повышается вязкость и снижается подвижность расплава, что ухудшает свойства расплава как среды хлорирования.

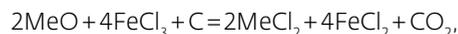
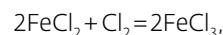
На скорость хлорирования оказывает влияние величина поверхности сырья и восстановителя. Поэтому перед подачей в хлоратор кремнийсодержащее сырье и восстановитель необходимо измельчать до крупности $\leq 0,16$ мм и высушивать до содержания влаги $< 1\%$ [13]. Показатель твердости по шкале Мооса для кварца равен 7, что позволяет использовать стандартное размольное оборудование, такое как шаровые мельницы. Пековый кокс обычно дробят на молотковых или двухвалковых дробилках и измельчают в шаровых мельницах до крупности не более 0,16 мм.

Солевой расплав является не только средой для хлорирования, но и универсальным катализатором, повышающим концентрацию атомарного хлора в зоне реакции, поэтому его природа имеет большое значение. В процессе активную роль играют расплавленные соли щелочных и щелочноземельных элементов, хлориды алюминия и железа. Значительное влияние на скорость хлорирования оказывает присутствие легкохлорируемых примесей железа и алюминия, увеличивающих скорость хлорирования в несколько раз.

Железо образует хлориды двух степеней окисления: хлорное железо (FeCl_3) и хлористое железо (FeCl_2). В солевом расплаве FeCl_2 химически связывает подаваемый в расплав хлор, переходя при этом в FeCl_3 . Хлорное железо

отдает атом хлора взвешенному в расплаве оксиду металла, образуя соответствующий хлорид и вновь превращаясь при этом в хлористое железо.

При этом процесс проходит через две чередующиеся стадии – стадию окисления хлористого железа хлором и стадию восстановления хлорного железа металлом:



где Me – металл.

Первая стадия процесса представляет собой химическое связывание газообразного хлора жидкостью. Эта реакция, проходящая на границе жидкой и газовой фаз, – типичный пример хемосорбции и может рассматриваться как процесс массопередачи при абсорбции, сопровождающейся химической реакцией.

Образовавшийся на стадии восстановления дихлорид железа реагирует с хлором с образованием хлорного железа, после чего процесс повторяется. Таким образом, хлорное железо выполняет функцию катализатора процесса и переносчика хлора к оксиду металла. Аналогичным образом каталитическим действием обладают соединения марганца и хрома.

Кремний взаимодействует с хлором в расплаве, содержащем переносчик хлора, с большей эффективностью, чем в расплаве чистых хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов. Если хлориды железа постоянно присутствуют в расплаве и не удаляются в процессе хлорирования, наличие железа в исходном сырье необязательно.

Кроме того, солевой расплав обеспечивает получение более качественного целевого продукта. Образующиеся при хлорировании хлориды железа и алюминия связываются с хлоридами калия и натрия, образуя комплексные соединения типа KFeCl_4 , NaAlCl_4 , которые в дальнейшем выводятся с отработанным расплавом. Вследствие этого облегчается последующая очистка целевого продукта.

Хлор в расплаве обладает незначительной растворимостью, это обстоятельство лимитирует стадию сорбции хлора на поверхности углерода. Соединения железа, алюминия, марганца и хрома, реагируя с хлором, переходят в хорошо растворимые в расплаве хлориды, являющиеся хорошими хлорирующими агентами.

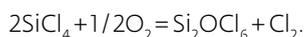
Значительное влияние на скорость процесса хлорирования оказывает состав расплава. В расплавах солей KCl , NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 хлорирование протекает неодинаково. Различная интенсивность хлорирования объясняется способностью этих хлоридов к образованию в расплаве комплексных соединений с продуктами реакции. Кроме того, скорость хлорирования оксидов зависит от поверхностного натяжения и вязкости расплава, а также

от смачиваемости хлорируемых материалов и типа восстановителя. Из данных солей наименьшая скорость хлорирования в расплаве CaCl_2 , а наибольшая – в расплавах KCl и NaCl . Поэтому рекомендуется [8] запускать хлоратор в работу на эквимольной смеси хлоридов натрия и калия, что позволяет снизить температуру кристаллизации исходного плава, а также уменьшить его вязкость. Для сокращения пускового периода и устранения проскоков хлора рекомендуется в плав затравку хлорного железа (5–7% от количества хлоридов щелочных металлов).

Физические свойства расплава зависят от количества нерастворимых в расплаве материалов. Оксиды металлов незначительно растворяются в расплаве хлоридов, углеродистые восстановители растворяются еще меньше. На отечественных предприятиях, эксплуатирующих солевые хлораторы, концентрацию хлорируемого оксида металла поддерживают в интервале 1,5–5%. При снижении концентрации меньше 1% возрастает скорость хлорирования других оксидов и хлоридов, что снижает скорость целевой реакции. Превышение концентрации более 5% ведет к ухудшению физических свойств расплава. Таким образом, для обеспечения максимальной скорости хлорирования диоксида кремния необходимо выбрать оптимальный состав солевого расплава, как по соотношению хлоридов щелочных металлов, так и по концентрации компонентов шихты и примесных соединений.

Определяющее значение для процесса хлорирования имеет температура расплава. Повышение температуры ведет к возрастанию скорости хлорирования окислов примесей, хлориды и оксохлориды которых попадают в систему конденсации и загрязняют тетрахлорид кремния, затрудняя его последующую очистку. Оптимизирование температуры позволит замедлить процесс хлорирования примесей, которые будут выводиться с отработанным расплавом.

Большое значение для процесса хлорирования имеет чистота хлора. Содержащиеся в хлоре примеси разбавляют парогазовую смесь и ухудшают процесс конденсации тетрахлорида кремния. Наиболее отрицательное влияние оказывает кислород, который может вступить во взаимодействие с тетрахлоридом кремния по реакции [15]:



Образующийся гексахлордисилоксан конденсируется вместе с тетрахлоридом кремния, загрязняя его. Кроме того, кислород реагирует с углеродом, образуя углекислый газ, который разбавляет парогазовую смесь и снижает парциальное давление тетрахлорида кремния. Следовательно, для производства тетрахлорида кремния методом хлорирования в расплаве хлоридов

щелочных металлов нужно использовать хлор с минимальным содержанием примесей, например, высшего сорта по ГОСТ 6718-93.

Влияние давления на скорость процесса хлорирования в технической литературе не отмечено. Согласно данным, представленным в работе [13], давление под сводом хлоратора регулируется в интервале $-1470...+1470$ Па ($-150...+150$ мм вод. ст.). В практике промышленного производства давление парогазовой смеси на выходе из хлоратора поддерживают на уровне ± 2942 Па (± 300 мм вод. ст.), что, по-видимому, способствует лучшему растворению хлора.

Технологические особенности хлорирования диоксида кремния в солевом расплаве необходимо учитывать при проектировании солевого хлоратора и при освоении промышленного производства тетрахлорида кремния из кремнезема.

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТРАДИЦИОННОЙ И НОВОЙ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПКК

На основе имеющихся данных по расходу сырьевых материалов определены стоимость сырья в традиционной технологии производства поликремния, применявшейся в отечественной промышленности, и новой технологии, основанной на хлорировании диоксида кремния в расплаве солей с гидрированием образующегося тетрахлорида кремния до трихлорсилана. ТК, образующийся при получении ПКК в процессе водородного восстановления, также гидрированием конвертируется в трихлорсилан.

Значительную долю стоимости в традиционной технологии занимает водород, поэтому в новой технологии необходимо использовать установку низкотемпературной регенерации компании Chemical Design, Inc. или блоки конденсации хлорсиланов и регенерации водорода производства АО «Красмаш», позволяющие разделять водород, хлористый водород и хлорсиланы, которые можно рециркулировать в технологической схеме. Такая технологическая схема позволяет снизить затраты на водород.

В табл. 1 представлены удельные расходы основных сырьевых материалов и их стоимость для традиционной и новой технологических схем производства ПКК. Цены на сырьевые материалы взяты на сайтах поставщиков. Расходы материалов по новой технологии получены расчетным путем на основе практики работы промышленных солевых хлораторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ расчетных значений позволяет сделать вывод о том, что переход с традиционной на новую технологию производства поликристаллического кремния может дать снижение затрат на сырье в 8,7 раз.

Таблица 1. Расходы и стоимость материалов

Сырьевые материалы	Расход на 1 кг ПКК	Цена	Стоимость, руб.	Суммарная стоимость материалов, руб.
Традиционная технология				
Кремний	5,788 кг	140000 руб. / т	810,32	4566,26
Хлор	20,907 кг	21599,6 руб. / т	451,58	
Водород	29,139 м ³	113,40 руб. / м ³	3304,36	
Новая технология				
Кремнезем	5,6914 кг	2200 руб. / т	12,52	521,69
Хлор	9,928 кг	21599,6 руб. / т	214,44	
Водород	2,480 м ³	113,40 руб. / м ³	281,23	
Кокс	1,544 кг	2500 руб. / т	3,86	
Карналлит	0,0114 кг	4892 руб. / т	0,06	
Хлористый калий	0,665 кг	11412 руб. / т	7,59	
Хлористый натрий	0,662 кг	3000 руб. / т	1,99	

Снижение производственных затрат в сочетании с использованием современного оборудования и цифровых систем управления технологическими процессами даст возможность решить задачу по созданию конкурентоспособного производства полупроводникового кремния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некрасов А. В., Наумов А. В. Перспективы рынка поликристаллического кремния // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2014. Т. 17. № 4. С. 233–239.
2. Критская Т. В., Шварцман Л. Я. Современные технологии получения кремния полупроводниковой чистоты // Тезисы докладов XI Конференции «Кремний-2016». – Новосибирск, 2016. С. 21.
3. Грибов Б. Г., Котков А. П. Проблемы получения и области применения высокоомного кремния и наночастиц кремния // Тезисы докладов X Конференции «Кремний-2014». – Иркутск, 2014. С. 8.
4. Иванов В. М., Трубицын Ю. В. Перспективы создания замкнутого производства поликристаллического кремния // Нові технології. 2010. № 1. С. 53–58.
5. Иванов В. М., Трубицын Ю. В. Актуальность гидрирования тетрахлорида кремния в технологии полупроводникового кремния // Тезисы докладов VII Международной конференции «Кремний-2010». – Нижний Новгород, 2010. С. 62.
6. Международная заявка WO 2015/199636 A1. Способ получения поликристаллического кремния / Шварцман Л. Я., Прутцков Д. В., Додонов В. Н.; заявл. 23.06.2014; опубл. 30.12.2015.
7. Критская Т. В., Шварцман Л. Я. Новая промышленная технология получения поликристаллического кремния «Кремний из песка» // Тезисы докладов XII Международной конференции «Кремний-2018». – Черноголовка, 2018. С. 8.
8. Фурман А. А., Рабовский Б. Г. Основы химии и технологии безводных хлоридов. – М.: Химия, 1970. 256 с.
9. Фурман А. А. Неорганические хлориды. – М.: Химия, 1980. С. 190.
10. А. с. 211524 СССР. Способ непрерывного получения четыреххлористого кремния / Фурман А. А., Мичкова З. И.; заявл. 15.06.1956; опубл. 19.11.1968.
11. Пат. 2450969 РФ. Способ производства тетрахлорсилана / Щелконогов А. А., Щелконогов М. А., Мальцев Н. А., Мальцев А. Н.; заявл. 8.11.2010; опубл. 20.05.2012.
12. Наумов А. В. Рынок поликристаллического кремния: состояние и перспективы // Электроника. 2015. № 9. С. 94–101.
13. Байбеков М. К., Попов В. Д., Чепрасов И. М. Производство четыреххлористого титана. – М.: Metallurgia, 1987. С. 12.
14. Фалькевич Э. С. и др. Технология полупроводникового кремния. – М.: Metallurgia, 1992. С. 146.
15. Липидус И. И., Нисельсон Л. А. Тетрахлорсилан и трихлорсилан. – М.: Химия, 1970. С. 13.

НА НОВОЙ ВЫСОТЕ



ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

более 60 конференций, круглых столов, семинаров и мастер-классов. Деловая программа «Future Hub» — инновационные научно-технические разработки молодых ученых

ПРЕМЬЕРЫ МАКС-2019

отечественный лайнер МС 21-300 и гражданские вертолеты Ка-62 и Ми-38 в полете и на земле. Новинки от Embraer и Pilatus.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПАВИЛЬОН

полноразмерный макет российско-китайского широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета CR-929

МАСШТАБНАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ БВС

беспилотники, авионика, двигатели и целевая нагрузка. Демонстрационные полёты БВС и встречи в рамках деловой программы.

БОЛЕЕ 1000 ДЕЛОВЫХ ВСТРЕЧ MATCHMAKING

поиск деловых партнёров для участников авиасалона: перечень компаний, готовых к встрече, контактные лица, расписание назначенных переговоров.

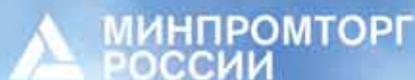
Подробности на www.aviasalon.com

МАКС 2019

Организаторы

Устроитель

КИТАЙ —
страна-партнёр



ЖУКОВСКИЙ • 27 АВГУСТА - 1 СЕНТЯБРЯ

Стратегический банк-партнёр



Стратегический партнёр



Генеральный финансовый партнёр



Официальный партнёр



Официальный страховщик



Международный
информационный партнёр



Генеральные информационные партнёры

