

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Навасардяна Ашота Александровича на тему: «Электромагнитный кристаллизатор кремния для получения слитков цилиндрической формы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 82 наименований и 3 приложений. Текст диссертации написан на 175 страницах, содержит 90 рисунков и 57 таблиц.

Автореферат имеет объем 24 страницы, а том числе 10 рисунков.

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа посвящена исследованию электромагнитных и тепловых процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния, разработке методики проектирования, обеспечивающей определение конструктивных параметров и алгоритма управления, позволяющих минимизировать затраты электроэнергии и отклонение формы слитка от цилиндрической.

Технологии производства кремния существенно отличаются в зависимости от вида конечного продукта. Достаточно высокие показатели достигаются в производстве металлургического кремния, используемого в металлургии для приготовления различных сплавов. Самая высокая степень очистки достигается при производстве «солнечного» кремния для электронной промышленности, но затраты делают продукцию слишком дорогой. Более экономически выгодным способом его производства является очистка металлургического кремния с использованием направленной кристаллизации расплава.

Особенностью производства металлургического кремния является литье в форму. При этом в процессе кристаллизации за счет расширения кремния происходит его плотное соединение с футеровкой, требующее ее разрушения для извлечения. Применение индукционных устройств для создания отталкивающих электромагнитных сил на этапе кристаллизации позволяет исключить попадание загрязняющих веществ с поверхности футеровки, но приводит к дополнительному нагреву. Поэтому при расчете параметров электромагнитного кристаллизатора необходимо одновременное выполнение условий для отталкивания расплава от стенки и эффективного охлаждения.

Вопросы расчета параметров электромагнитных кристаллизаторов в литературе рассмотрены достаточно подробно для сплавов с высокой электропроводностью. Кремний отличается низкой электропроводностью в расплавленном состоянии, которая резко уменьшается при кристаллизации, что делает проблематичным использование индукционного нагрева. Кроме этого из-за высокой хрупкости кремния необходимо осуществлять кристаллизацию с учетом ограничений на термонапряжения. Кристаллизация с заранее заданным фронтом сопровождается изменением распределения плотности тока, что приводит к необходимости регулирования мощности, чтобы управлять формообразованием слитка и обеспечить минимум энергозатрат.

Для расчета электромагнитного кристаллизатора автором использованы математические модели электромагнитных и тепловых процессов, учитывающие значительное изменение параметров и позволяющие создание алгоритмов эффективного управления режимом работы.

Решаемая проблема снижения энергозатрат в электромагнитном кристаллизаторе и повышения качества кремния имеет важное значение и является актуальной.

Оценка новизны и достоверности основных результатов диссертации

В диссертации получены результаты, имеющие научную новизну:

- разработана уточненная математическая модель нестационарного теплового процесса кристаллизации кремния, отличающаяся учетом значительного и неравномерного по объему изменения мощности внутренних источников тепла и физических свойств;
- впервые решена комплексная задача моделирования электромагнитных и тепловых процессов при поиске алгоритма изменения мощности тепловыделения и электромагнитных сил в электромагнитном кристаллизаторе для обеспечения качественной кристаллизации кремния.
- определена область параметров расплава и индуктора, в которой возможно функционирование электромагнитного кристаллизатора кремния в условиях взаимных ограничений на электромагнитные силы и мощность тепловыделения, выражающихся в необходимости увеличения сил и снижения мощности тепловыделения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением корректных математических методов исследования, компьютерным моделированием и их сравнением с результатами, полученными другими авторами.

Значимость результатов диссертации для науки и практики

Проведенные исследования позволили выявить и учесть взаимовлияние электромагнитных и тепловых процессов в ходе кристаллизации расплава кремния, а также задать зависимости распределенных параметров от температуры, что повысило точность математических моделей процесса. Использование комплекса математических моделей, учитывающих изменение агрегатного состояния кремния, а также параметров индуктора, позволяет более корректно описать процесс кристаллизации расплава при программном управлении.

Научная и практическая значимость результатов работы подтверждается тем, что полученные положения, выводы и рекомендации использованы:

- при выполнении фундаментальной НИР при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А по заданию Министерства образования РФ;
- в учебном процессе в Самарском государственном техническом университете;
- в ООО «Вольтс» (г. Самара) и ООО «ПриволжскНИПИнефть» в качестве методик расчета индукционных установок для различных технологических процессов, что подтверждается актами внедрения.

Можно сделать вывод о целесообразности применения предложенных математических моделей и методик расчета не только для решения поставленной в работе задачи, но и для других задач индукционного нагрева.

Анализ и оценка содержания и оформления диссертации

Диссертационная работа представляет собой последовательное и аргументированное изложение решений поставленных авторов задач.

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведена краткая информация об объекте исследования, характеризуется научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, информация о публикациях по теме диссертации.

Первая глава посвящена обзору существующих технологий производства кремния, которые зависят от предъявляемых требований к степени его чистоты. Самые высокое качество требуется при производстве кремния для электронной промышленности, однако при этом затраты на производство велики. Более дешевыми являются технологии получения кремния для металлургической промышленности с меньшей степенью очистки, при которых используется карботермическое восстановление из окиси кремния. Для дальнейшего повышения чистоты кремния применяется металлургический метод с использованием направленной кристаллизации.

Управлению процессом кристаллизации кремния посвящено немало работ. В основном, используется резистивный нагрев для обеспечения требуемого градиента температуры в слитке и формирования фронта кристаллизации. Приведен пример использования индукционных нагревателей для подогрева стенок графитовой теплоизоляции, что позволяет решить задачи нагрева кремния и управлять градиентом температуры в процессе кристаллизации.

Во второй главе рассмотрены вопросы построения математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в кристаллизаторе и процессов упругой деформации в твердой части слитка.

Моделирование процессов выполнено с помощью программы, использующей метод конечных элементов. При решении электромагнитной задачи использование численного метода позволило учесть сложную геометрию системы «индуктор – загрузка» и изменение физических свойств в расчетной области. Для формирования требуемого распределения электромагнитных сил по высоте загрузки с учетом изменения гидростатического давления от осевой координаты необходим поиск конструкции индуктора, обеспечивающей лучшее приближение к требуемой диаграмме. При расчете распределения температуры в системе «загрузка – футеровка» рассмотрены процессы теплопроводности в элементах системы и теплообмен между расплавом, футеровкой и окружающей средой.

Процесс кристаллизации кремния в условиях значительных градиентов температуры и с учетом высокой хрупкости кремния в твердом состоянии может привести к значительным дефектам. Для определения термонапряжений

автором разработана модель процессов упругой деформации, чтобы использовать результаты расчетов для коррекции тепловых процессов.

Третья глава посвящена вопросам расчета параметров электромагнитного кристаллизатора кремния периодического действия.

Построение диаграммы распределения электромагнитных сил при поиске параметров индуктора показало, что в условиях конструктивных ограничений лучшее приближение к заданному обеспечивает коническая форма индуктора с углом наклона направляющей, равным 30 градусов. Дополнительно для индуктора определены радиус, высота и смещение относительно загрузки.

В ходе процесса кристаллизации значительно изменяется распределение температуры в загрузке, что влечет за собой изменение распределения электромагнитных сил по высоте и сопротивления индуктора. В верхней части расплава при изменении значений сил и мощности требуется компенсировать за счет мощности индуктора.

При расчете тепловых процессов определены значения тепловых потоков с боковой и верхней поверхностей слитка, при этом обеспечивается наилучшая траектория движения фронта кристаллизации. Для улучшения процесса в систему теплоизоляции добавлена крышка с подогревом. Проведенные исследования для процессов, протекающих с требуемым фронтом кристаллизации, показали, что термонапряжения не превышают допустимые значения.

В результате расчетов определены параметры системы, обеспечивающие минимальные затраты энергии и отклонение формы слитка от цилиндрической.

Четвертая глава посвящена поиску параметров электромагнитного кристаллизатора методического действия.

Процедура заливки расплава кремния выполняется дискретно после затвердевания каждого предыдущего слоя. Найденные параметры системы обеспечивают кристаллизацию каждого слоя без повторного расплавления при заливке следующих слоев. Проведенные исследования показали возможность уменьшения времени кристаллизации каждого слоя до 100 секунд. Изменяющиеся параметры индуктора в ходе процесса кристаллизации, имеющие периодическую и экспоненциальную составляющие, сопровождаются коррекцией за счет регулирования активной и реактивной мощности индуктора.

Система кристаллизации периодического действия отличается лучшими энергетическими характеристиками и быстродействием, но начало кристаллизации каждого слоя требует дополнительного исследования из-за вероятности возникновения значительных термонапряжений.

Пятая глава посвящена реализации индукционной системы электромагнитного кристаллизатора периодического действия.

Для управления процессом кристаллизация расплава кремния необходимо соответствие тока и мощности индуктора каждому состоянию объекта, то есть распределению температуры. На основании расчетов найдены параметры индукционной системы, изменяющиеся в ходе процесса. Из-за недоступности для измерения температуры в столбе расплава осуществлен поиск алгоритма построения системы управления мощностью индуктора.

Для управления процессом избрана система программного управления мощностью индуктора, которая рассчитывается на основе информации о распределении температуры, определяемом по косвенным данным – величине внутреннего сопротивления индуктора. По результатам расчетов определены интегральные характеристики индуктора для загрузки с разным числом слоев жидкого кремния, что позволило построить зависимость полного сопротивления индуктора от средней температуры загрузки. В системе управления предусмотрено формирование зависимости полного сопротивления индуктора во времени.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе не рассматривается и не оценивается влияние перемешивания, хотя оно может серьезно отразиться на расчете тепловых процессов, а лишь указано, что «... в условиях продольной неоднородности температурного распределения возникают вертикальные составляющие усилий, приводящие к перемешиванию, что затрудняет расчеты» (стр.37).
2. В выражении (2.14) учтена относительная магнитная проницаемость, однако не приводится информация о ее значении, виде зависимости от напряженности магнитного поля и влияния на решение задачи (стр.40).
3. Уравнение теплопроводности для процессов (2.34), протекающих в системе «кремний - теплоизоляция», записано без учета изменения плотности, которое довольно значительно при изменении агрегатного состояния. Обоснования такому упрощению не приведено (стр.46).
4. Тепловая (2.34) и связанная с ней электротепловая (2.42, 2.43) задачи сформулированы для двумерной осесимметричной области. Это приводит к тому, что при ограниченной длине индуктора на распределении напряженности магнитного поля сказывается неравномерность по угловой координате. В работе данный вопрос не рассмотрен (стр.48).
5. В разделе 3.2 при моделировании тепловых процессов для обеспечения желаемого вида фронта кристаллизации среди варьируемых параметров выступает тепловой поток от загрузки к охладителю. Неясно, как достигается заданная величина, механизм регулирования мощности не раскрыт (стр.100-104).
6. При расчете термонапряжений в загрузке, содержащей твердую и жидкую фракции, не описан механизм изменения агрегатного состояния. Программа расчета тепловых деформаций предполагает изменение температуры, но не столь резкое изменение свойств (стр.104-114).
7. При плавлении кремния увеличивается его плотность на 10%, что приводит к изменению объема. При расчете термонапряжений в процессе кристаллизации данное явление не нашло отражения (стр.104-114).
8. При моделировании кристаллизации (рис.4.9 и др.) температура на границе твердого кремния и расплава резко снижается. Учитывая изменение объема на 10%, должны возникать большие термонапряжения, сопровождающиеся образованием дефектов кристаллической решетки (стр.129-141).
9. Допущены погрешности оформления, перечень которых передан автору.

Заключение по диссертационной работе

Указанные замечания не влияют на научную и практическую ценность полученных в диссертационной работе результатов.

Диссертация написана на высоком научно-теоретическом уровне, выполнена на актуальную тему, содержит решение важной научной задачи повышения эффективности процессов индукционного нагрева в установках непрерывного и методического действия.

Содержание автореферата полностью отражает основные положения диссертации.

Основные результаты работы и выводы отражены в 9 публикациях, в том числе в трех статьях в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования результатов кандидатских диссертаций.

В диссертации четко определен вклад автора в разработку проблемы в работах, опубликованных коллективно с соавторами.

Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Корректность изложения научного материала, результаты компьютерного моделирования позволяют положительно оценить содержание и значимость проведенных исследований, а также объективность сделанных выводов.

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой и отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Навасардян Ашот Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии»
Национального исследовательского университета
«Московский энергетический институт»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор



А. Б. Кувалдин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14
тел. +7 (495) 362-70-75
e-mail: kuvaldinab@mpei.ru

