

На правах рукописи

Кичигин Вячеслав Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПОЛУЧЕНИЯ МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ
В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ С ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ**

Специальность: 05.09.10 – Электротехнология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Позняк Игорь Владимирович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Гончаров Вадим Дмитриевич кандидат технических наук Горюшин Георгий Александрович
Ведущая организация:	Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Защита состоится 21.12.2011 г. в _____ ч. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан 18.11.2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Белов М.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно статье 21 федерального закона № 35 – ФЗ «Об Электроэнергетике», принятого Государственной думой 21 февраля 2003 года, одним из основных направлений государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики, является поддержка использования возобновляемых источников энергии. На фоне экологических проблем и периодического удорожания традиционных невозобновляемых источников энергии можно ожидать, что эта поддержка будет только усиливаться.

Одним из экологически чистых способов производства электроэнергии является преобразование солнечного света в электричество при помощи солнечных батарей, широкому использованию которых препятствует высокая стоимость фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Наиболее перспективными для широкомасштабного наземного применения являются ФЭП, подложка которых выполнена из мультикристаллического кремния солнечного качества (99,9999 % чистоты). Коэффициент полезного действия таких ФЭП находится на уровне 16%, что на 1–2% меньше КПД ФЭП на подложке из монокристаллического кремния. При одинаковом ресурсе работы, составляющем 10 лет, производство мультикристаллического кремния значительно дешевле, что делает использование его в качестве материала подложек ФЭП наземного применения более выгодным.

Основная масса мультикристаллического кремния для ФЭП производится методом направленной кристаллизации расплава в тиглях из особо чистого кварца. Основными недостатками метода являются периодичность процесса и использование дорогостоящих одноразовых тиглей. Это является препятствием для снижения стоимости ФЭП, 70% которой составляет стоимость кремниевой подложки.

Наиболее перспективным путем повышения эффективности производства мультикристаллического кремния является технологическая схема, совмещающая индукционный метод нагрева с незагрязняющим способом плавки в гарнисаже и непрерывно–последовательной кристаллизацией расплава в слиток прямоугольного поперечного сечения. В мире только две фирмы занимаются разработкой технологии направленной непрерывно-последовательной

кристаллизации солнечного кремния в индукционной печи с холодным тиглем: Sumko Solar Corporation (Япония) и Emix (Франция). Однако, техническая информация об этом представляет коммерческую тайну.

В России началось восстановление производства поликристаллического кремния, в том числе и солнечного качества, однако отсутствует последующий цикл его переработки в мультикристаллический кремний. Очевидно, что задача разработки российской технологии и оборудования для получения мультикристаллического кремния является актуальной.

Актуальность темы диссертационной работы заключается в разработке, отсутствующей в России, технологии и оборудования для получения прямоугольных в поперечном сечении слитков мультикристаллического кремния солнечного качества.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование технологии получения слитков мультикристаллического кремния солнечного качества, путём непрерывно-последовательной кристаллизации расплава в индукционной печи с холодным тиглем.

Исследовательские задачи, решаемые в работе:

- Анализ методов и оборудования для получения кремния, используемого при производстве подложек ФЭП;
- Исследование на математической модели тепловых и электрических параметров плавки, условий кристаллизации и отжига слитка кремния;
- Разработка экспериментального исследовательского стенда;
- Разработка технологии стартового нагрева кремния;
- Разработка технологии непрерывно–последовательной плавки кремния в индукционной печи с холодным тиглем с получением слитка прямоугольного сечения;
- Экспериментальное исследование энергетических характеристик непрерывно–последовательной плавки кремния и сравнение результатов с теоретическими исследованиями.

Методы исследования. В работе использовались теоретические и экспериментальные исследования, на основе методов математической физики, вычислительной математики и теории индукционного нагрева. Обоснован-

ность допущений, принятых при численных исследованиях, проверялась на результатах физического моделирования.

Для онлайн регистрации тепловых и электрических параметров плавки использовался информационно-измерительный комплекс, созданный на базе модульной системы сбора данных. В теоретических исследованиях использованы математические модели индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) и разработанные на их основе программные комплексы, реализованные в среде коммерческого пакета ANSYS. Достоверность разработанных математических моделей определялась путём сравнения результатов натуральных и численных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Математические модели электромагнитного и теплового полей индукционной печи с холодным тиглем для плавки кремния;
- Критерии выбора частоты источника питания;
- Технология стартового нагрева;
- Результаты исследований параметров индукционной печи с холодным тиглем для плавки кремния.

Достоверность научных и практических результатов. Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации подтверждена экспериментально, путём использования современной измерительной аппаратуры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработан программный комплекс, включающий трёхмерные модели электромагнитного и теплового полей с модулем кристаллизации;
- Разработана технология стартового нагрева кремния в холодном тигле;
- Определены тепловые и электрические характеристики непрерывно-последовательной плавки кремния в индукционной печи с холодным тиглем с получением слитка мультикристаллического кремния солнечного качества.

Практическая ценность состоит в следующем:

- Разработана прикладная программа для автоматизированного проектирования индукционных тигельных печей (свид. о регистрации программы для ЭВМ №2010614087);

- Разработана прикладная программа для расчета теплового состояния ванны расплава при зонной плавке в индукционной печи с холодным тиглем (свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2011612615).
- Сформулированы критерии выбора частоты источника питания индукционной печи с холодным тиглем при непрерывно-последовательной направленной кристаллизации расплава кремния;
- Выработаны рекомендации по проектированию индукционной печи с холодным тиглем для получения мультикристаллического кремния, которые способствуют увеличению электрического КПД процесса.
- Разработаны рекомендации по организации стартового нагрева кремния.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (СПбГЭТУ) в учебном процессе по дисциплинам: «Моделирование электротехнологических процессов», «Фундаментальные основы высокочастотной электротехники и электромагнитной обработки материалов», «Теоретические основы высокочастотной электротехники»

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты докладывались и обсуждались на Международном семинаре по индукционному нагреву – NES–10 (Падуа, Италия, 2010); на XII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (21 – 23 июня 2010 г., Самара, Россия); на международном молодежном форуме «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ» (19 – 13 сентября 2011, Санкт Петербург), на семинаре по возобновляемым источникам энергии (март 2010, Ганноверский университет, Германия), на внутривузовских научно-технических конференциях профессорско–преподавательского состава СПбГЭТУ 2009 – 2011 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе одна в журнале из перечня, рекомендованного ВАК, 1 статья в другом журнале, 4 работы в научно-технических конференциях, зарегистрированы две прикладные программы.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 78 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 118 страницах машинописного текста. Работа содержит 50 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, формулируется цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту, рассматривается её научная и практическая значимость, кратко изложено содержание работы.

В первой главе даётся характеристика кремния солнечного качества, поли-, мульти- и монокристаллической структуры. Описаны стадии производства кремния для фотоэлектрических преобразователей, начиная с производства металлургического кремния и заканчивая выращиванием слитков мульткристаллической структуры. Проведён анализ методов производства поли-, мульти- и монокристаллического кремния. Подробно рассматриваются наиболее распространённые методы получения кремния моно- и мульткристаллической структуры с указанием их достоинств и недостатков. На основании результатов проведённого анализа делается вывод о целесообразности получения мульткристаллического кремния методом непрерывно-последовательной кристаллизации расплава в индукционной печи с холодным тиглем.

Проведённый патентный поиск и анализ источников информации, посвящённых технологии и оборудованию для получения мульткристаллического кремния в индукционной печи с холодным тиглем, позволил составить общую картину реализации этой технологии и выявил некоторые особенности используемого технологического оборудования. Техническая информация по ведению технологического процесса и используемого оборудования отсутствуют или указана как представляющая коммерческую тайну.

Вторая глава посвящена разработке программного комплекса, включающего трёхмерные модели электромагнитного и теплового полей с модулем кристаллизации, а также исследованию электрических и тепловых параметров плавки кремния в индукционной печи с использованием разработанных математических моделей. Определён критерий для выбора частоты тока источника питания.

Получение мульткристаллического кремния в индукционной печи с холодным тиглем является сложной многоэтапной задачей. Это обуславливает необходимость применения численного моделирования для каждой из стадий

процесса, начиная от плавки исходной шихты и заканчивая получением требуемого температурного поля внутри слитка (рис. 1).

Индукционная печь включает в себя холодным тигель прямоугольный в поперечном сечении, собранный из медных водоохлаждаемых секций, отделённых друг от друга воздушными зазорами. Снаружи тигля, соосно с ним, размещён медный водоохлаждаемый индуктор. Такая конструкция требует использование трёхмерного математического моделирования физических процессов.

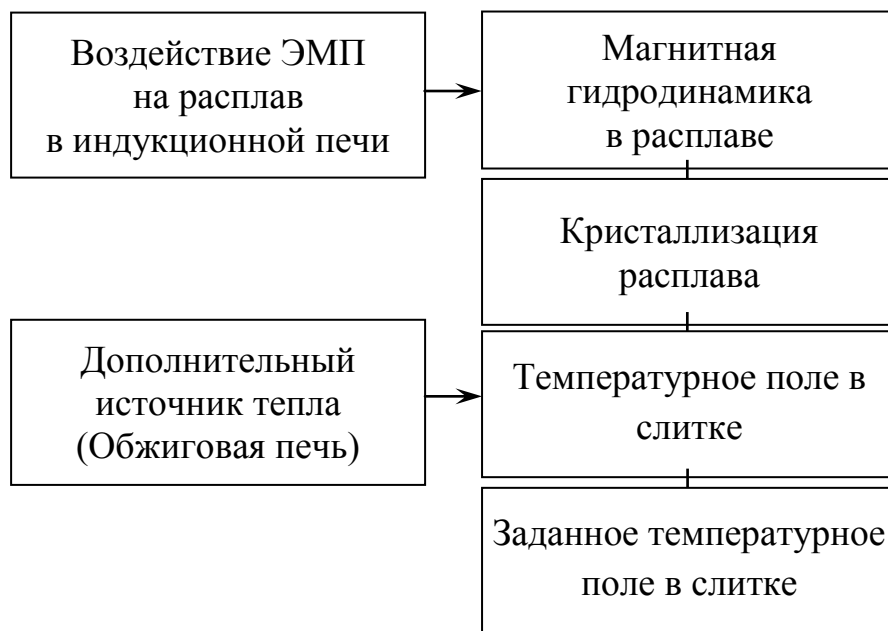


Рис. 1. Физические явления при ИПХТ кремния

Математическая модель электромагнитного поля описывается системой дифференциальных уравнений относительно комплексной переменной, при условии, что значение источников тока определяются по первой гармонике от функции воздействующего сигнала на рассматриваемую область:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y}(v_z(\dot{A}_{yx} - \dot{A}_{xy})) - \frac{\partial}{\partial z}(v_z(\dot{A}_{xz} - \dot{A}_{zx})) + j\omega\sigma_x \dot{A}_x = J_{истx} \\ \frac{\partial}{\partial z}(v_x(\dot{A}_{zy} - \dot{A}_{yz})) - \frac{\partial}{\partial x}(v_z(\dot{A}_{yx} - \dot{A}_{xy})) + j\omega\sigma_y \dot{A}_y = J_{истy} \\ \frac{\partial}{\partial x}(v_y(\dot{A}_{xz} - \dot{A}_{zx})) - \frac{\partial}{\partial y}(v_x(\dot{A}_{zy} - \dot{A}_{yz})) + j\omega\sigma_z \dot{A}_z = J_{истz} \end{cases}$$

где: A, J – комплексные значения векторного магнитного потенциала и плотности тока; ω – круговая частота; σ – удельная электрическая проводимость среды.

Граничные условия определяются как $A = 0; \frac{\partial A}{\partial n} = 0$. На внешней поверхности расчетной области граничные условия имеют вид $A = 0$. Сложность геометрии индукционной системы требует введения большого количества элементов расчётной сетки. Однако, существующая симметрия в исследуемой области позволяет проводить численный анализ в одной четверти геометрической модели, что позволяет значительно снизить количество элементов сетки. В плоскостях симметрии задаются дополнительные граничные условия, определяющие симметричное или антисимметричное распределение искомой функции.

Математическая модель теплового поля описывается нестационарным уравнением Фурье в трёхмерной постановке:

$$\gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где γ – плотность, кг/см³; c_p – теплоёмкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; λ – теплопроводность, Вт/(м·К).

Граничные условия задаются следующим образом. На зеркале и дне расплава соответственно имеют вид:

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{расп}}, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -q_{\text{дно}};$$

на боковых поверхностях, прилегающих к стенкам тигля:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -q_{\text{бок}}, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -q_{\text{бок}};$$

в плоскостях симметрии: $\frac{\partial T_y}{\partial y} \neq 0$ и $\frac{\partial T_x}{\partial x} \neq 0$.

Использование математических моделей для расчёта электромагнитного и теплового полей позволяют определить режимы для стартового нагрева кремния и режимы плавки кремния.

Модель кристаллизации основана на тепловом балансе на границе раздела фаз. Форма фронта кристаллизации расплава определяется по найденному температурному полю в расплаве, межфазном слое и слитке.

В работе показано, что выбор частоты тока источника питания печи ИПХТ кремния необходимо проводить с учетом максимального электрического КПД системы, минимальной высоты мениска расплава и минимальной высоты ванны расплава с равномерным распределением температуры по ее объему. При ИПХТ кремния на частоте 100 кГц в тигле размером 12.5×12.5 см высота мениска составила 12 % от высоты расплава. При ИПХТ кремния на частоте 30 кГц в тигле размером 22×22 см высота мениска составила 15 % от высоты расплава (рис. 2). Однако, при низкой частоте источника питания, возникает интенсивное перемешивание расплава, что ведет к искривлению формы фронта кристаллизации и уменьшению области роста столбчатых кристаллов.

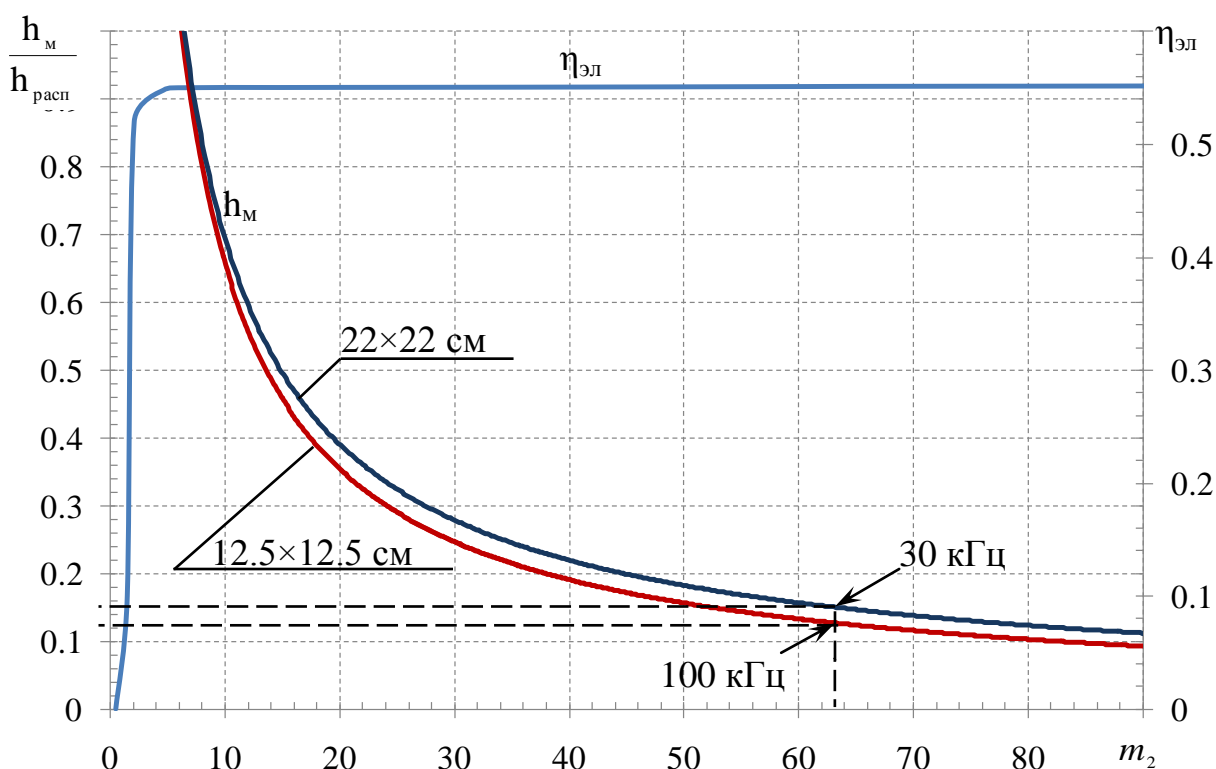


Рис. 2. Зависимость электрического КПД и высоты мениска от частоты

Проверка достоверности результатов расчётов осуществлялась сравнением полученных экспериментально данных с результатами численного моде-

лирования. Ошибка вычислений энергетических параметров плавки не превысила 11 %.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям. Приводится детальное описание исследовательского стенда для плавки кремния, который включает в себя индукционную печь с водоохлаждаемым тиглем; транзисторный генератор ELOMAT EM36/440/400/P с выходной мощностью до 350 кВт, частотным диапазоном 80 – 350 кГц и диапазоном изменения выходного напряжения генератора 0 – 400 В; конденсаторную батарею; рабочую камеру; системы управления; систему регистрации данных.

Приведено описание индукционной печи с холодным тиглем, использовавшейся в экспериментах по получению мультикристаллического кремния. Основные критерии выбора геометрии холодного тигля были следующие:

- тигель должен быть квадратным в поперечном сечении, с размерами в которое укладывается целое число стандартных модулей ФЭП;
- тигель должен быть проходным для обеспечения непрерывно-последовательной кристаллизации расплава кремния.

Исследование режимов стартового нагрева кремниевой шихты позволило установить размеры графитового основания и его положение относительно индуктора, обеспечивающие надёжное начало плавки кремния. Величина зазора между графитовым основанием и внутренней стенкой тигля, должна быть такой, чтобы обеспечить образование расплава в зазоре.

Одной из целей экспериментов по плавке кремния являлось определение массовой скорости плавления шихты, поскольку эта величина определяет скорость вытягивания слитка из тигля при непрерывно–последовательной кристаллизации расплава.

Массовую скорость плавления шихты, можно определить как:

$$M_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{изл}}}{(H_{\text{Тр}} - H_{298})},$$

где $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения, передаваемая в шихту, Вт; $(H_{\text{Тр}} - H_{298})$ – энтальпия расплава кремния, расчётное значение которой составляет 3025 Дж/г.

Мощность излучения с поверхности ванны расплава, падающая на стенки тигля, определялась с учётом экспериментальных значений тепловых потерь в тигель по временной зависимости после засыпки зеркала расплава ших-

той. Величина, на которую уменьшаются общие тепловые потери в тигле, и характеризует часть мощности $\Delta P_{\text{изл1}}$, падающую на стенку тигля. Ввиду того, что не всё излучение попадает на стенки тигля, то остаётся неопределённой часть потерь $\Delta P_{\text{изл2}}$. Определение этой мощности $\Delta P_{\text{изл2}}$, осуществляется по формуле:

$$\Delta P_{\text{изл2}} = (1 - \xi) \cdot \varepsilon \cdot 5.67 \cdot S_2 \cdot \left[\left(\frac{T_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

где ξ – коэффициент диафрагмирования; $\varepsilon = 0.2$ – коэффициент черноты расплава кремния; S_2 – площадь зеркала расплава м²; T_p – температура поверхности расплава, °К, T_0 – температура окружающей среды.

Коэффициент диафрагмирования определяется как:

$$\xi = f \left(\frac{D_p}{h_t - h_p} \right).$$

где h_t – высота стенки тигля над расплавом, м; h_p – высота расплава, м; D_p – диаметр зеркала расплава, м.

На основании определённой массовой скорости плавки шихты было определено ежеминутное приращение высоты ванны расплава, которое определяет скорость вытяжки слитка в непрерывно–последовательном режиме плавки, составившей 1.26 мм/мин.

Ещё одним важным параметром, определяющим энергетические характеристики плавки, является тепловой поток от расплава в стенку тигля:

$$P_{\text{бок}} = \frac{P_2}{S_{\text{бок}}},$$

где P_2 – мощность в расплаве; $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности ванны расплава. Для нахождения теплового потока от расплава в стенку тигля нужно определить мощность в расплаве P_2 . Для этого был проведён следующий эксперимент. Выключался источник питания, осуществлялось калориметрирование суммарных тепловых и электрических потерь в стенки и дно тигля. Мощность электрических потерь перестаёт выделяться мгновенно, а тепловые потери определяются теплом, запасённым ванной расплава. Графическое представление методики определения удельного теплового потока от расплава в стенку тигля представлено на рис. 3. Экспериментальное значение удельного теплового потока составило 64 Вт/см².

Четвёртая глава посвящена определению фронта кристаллизации расплава кремния в тигле, анализу структуры и чистоты полученного слитка, исследованию температурного поля внутри слитка при непрерывно-последовательной кристаллизации расплава. Производится проектирование индукционной печи для получения мультикристаллического кремния с заданными характеристиками. Дана оценка эффективности разработанной технологии получения мультикристаллического кремния.

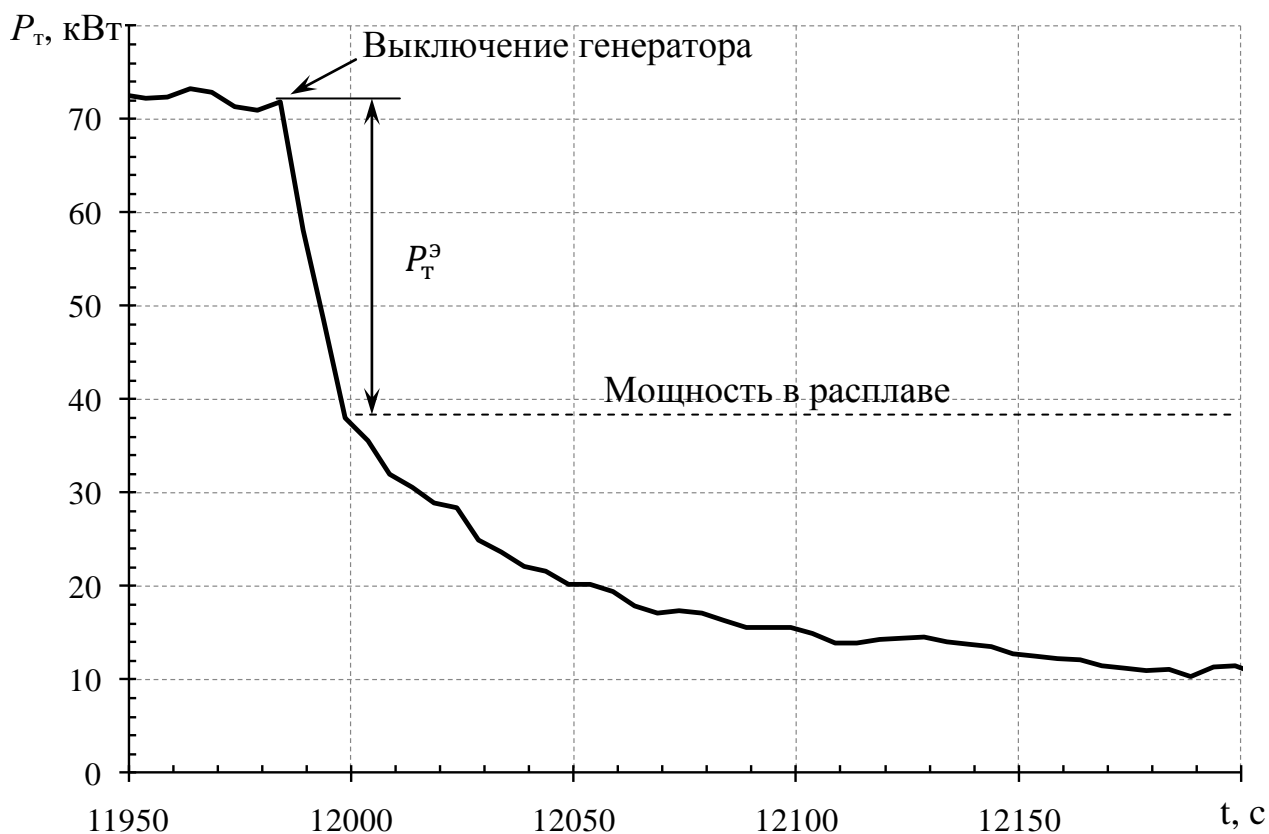


Рис. 3. Тепловые потери в стенку тигля до и после выключения генератора

В полученном слитке преобладают кристаллы осевой направленности с размером не менее 2 мм в поперечном сечении (рис. 4). Это говорит о том, что фронт кристаллизации расплава кремния приближен к плоскому.

Исследование температурного поля осуществлялось на основе численного моделирования. Целью исследования было определение необходимого теплового потока, для обеспечения заданного температурного градиента во всём объёме слитка и расположение нагревательного элемента относительно тигля и отжигаемого слитка. Максимальный градиент температуры, который

должен присутствовать в объеме слитка, после того как он вышел из тигля, составляет $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Диапазон температур в котором должен соблюдаться заданный градиент составляет $700 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

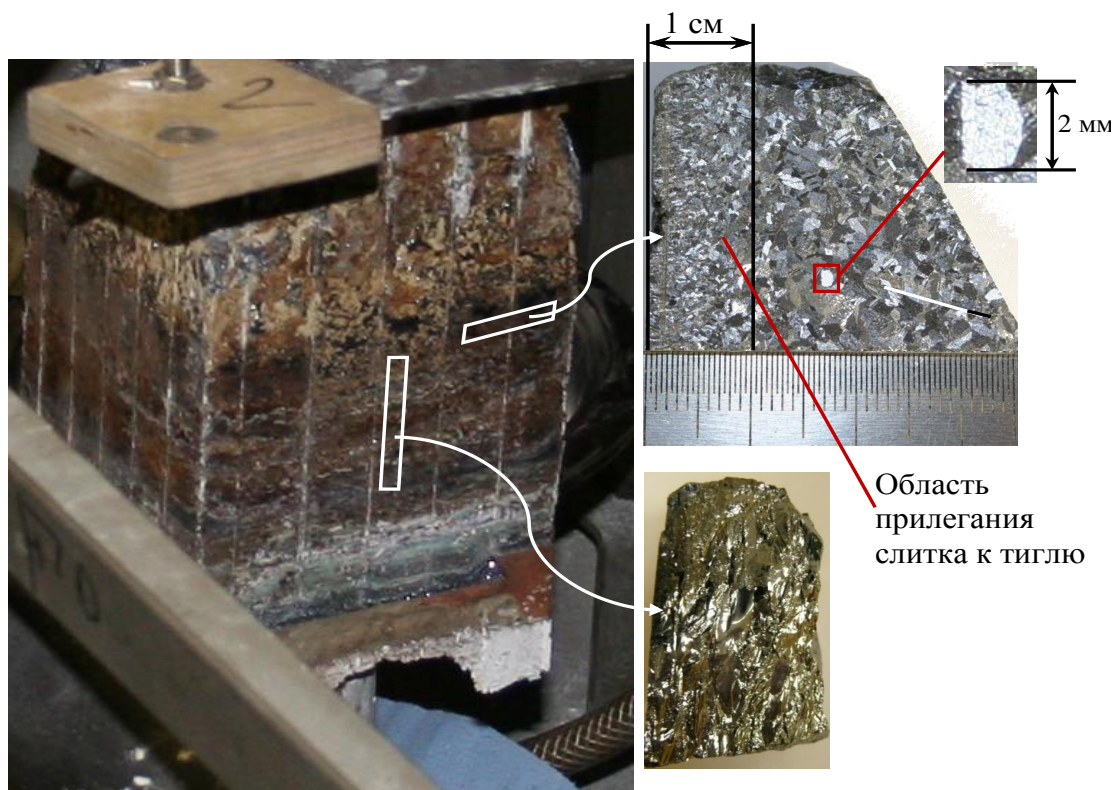


Рис. 4. Слиток мультикристаллического кремния

Проектирование новой индукционной печи с холодным тиглем для получения мультикристаллического кремния осуществлялось по следующим критериям:

- уменьшения электрических потерь тигля;
- уменьшения высоты индуктора.

При выборе внутренних размеров тигля в поперечном сечении, требуется исходить из стандартов, которые предъявляют к размерам ячеек ФЭП.

Проектирование производилось на основе комплекса разработанных математических моделей, описывающих электромагнитные, тепловые и кристаллизационные процессы, имеющие место при индукционной плавке кремния в холодном тигле. Расчет электрических характеристик индукционной печи производился для рабочей частоты 100 кГц , с внутренними размерами тигля $15\times 15\text{ см}$, ориентированный на размер подложек $12.5\times 12.5\text{ см}$. Результаты

расчета показали, что уменьшение высоты секций тигля способствует снижению электрических потерь в тигле и увеличению электрического КПД индукционной системы.

Эффективность, разработанной технологии получения мультикристаллического кремния с использованием индукционной плавки в холодном тигле на частоте 100 кГц, определялась на основе оценки электрического КПД индукционной печи. Для этого сравнивались экспериментально полученные энергетических параметры плавки на частотах 100 кГц и 30 кГц (рис. 5). Сравнение электрических мощностей в элементах индукционной системы показывает, что плавка на частоте 100 кГц имеет большую эффективность.

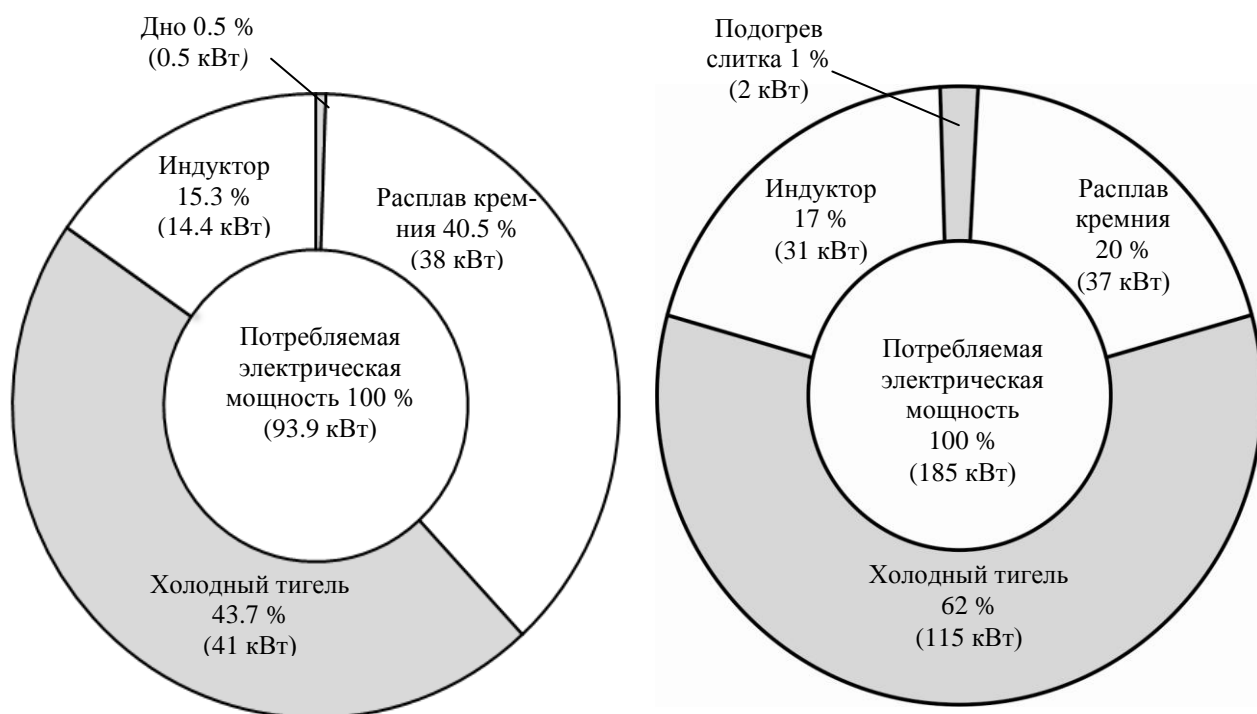


Рис. 5. Распределения мощностей в элементах индукционных систем на частотах 100 кГц и 30 кГц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработан программный комплекс, включающий электромагнитную, тепловую и кристаллизационную модели в трехмерной постановке.
2. Разработана и исследована технология стартового нагрева кремния. Выработаны рекомендации по ведению стартового нагрева.
3. Исследованы тепловые и электрические характеристики индукционной печи с холодным тиглем при непрерывно-последовательной направленной кристаллизации расплава кремния.
4. Разработаны прикладные программы для анализа и автоматизированного проектирования индукционных тигельных печей.
5. Выработаны рекомендации по проектированию индукционной печи с холодным тиглем для получения мультикристаллического кремния.
6. Сформулированы критерии выбора частоты источника питания индукционной печи с холодным тиглем при непрерывно-последовательной направленной кристаллизации расплава кремния.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертации опубликованы в работах, представленных ниже.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Кичигин В.В. Получение кремния солнечного качества с использованием непрерывной индукционной плавки в холодном тигле [Текст] / В.В. Кичигин, И.В. Позняк, А.Ю. Печенков и др. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – СПб., 2011. – Вып.4. – С.53–57.

Другие статьи и материалы конференций:

2. Кичигин В.В. Исследование закалки образцов из расплава системы $Al_2O_3-ZrO_2$ [Текст] / И.В. Позняк, А.И. Максимов, В.В. Кичигин и др. // Известия государственного электротехнического университета, Сер. Электротехника. – СПб., 2008. – Вып.5. – С.29–32.
3. Кичигин В.В. Исследование энергетических характеристик индукционной системы с холодным тиглем [Текст] / А.Н. Шатунов, В.В. Кичигин и др. //

Труды XII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 21-23 июня 2010 г. - Самара, 2010.– С. 100-104.

4. Кичигин В.В. Технология получения мультикристаллического кремния на основе индукционной плавки в холодном тигле [Текст] / В.В. Кичигин, И.В.Позняк и др. // Труды XII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 21-23 июня 2010 г. - Самара, 2010.– С. 105-109.
5. Kichigin V. Study of direct solidification technology of multicrystalline silicon in cold crucible [Text] (Исследование технологии получения мультикристаллического кремния методом направленной кристаллизации в холодном тигле) / V. Kichigin, I. Pozniak, B. Nacke // HES-10, International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources Induction, Conduction, Dielectric and Microwaves & EMP, Padua (Italy), May 19-21, 2010.
6. В.В. Кичигин, А.Н. Шатунов, И.В. Позняк. "Получение мультикристаллического кремния в индукционной печи с холодным тиглем". Международный молодежный форум "ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ". 19-13 Сентября 2011, Санкт Петербург. Сб. докладов, стр. 60. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011.

Зарегистрированные программные средства:

7. Рег. Номер 2010614087 (23.07.2010). Авторы: Позняк И.В., Шатунов А.Н., Кичигин В.В., Максимов А.И., Печенков А.Ю., Блинов Ю.И. (RU). Правообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский электротехнический университет "ЛЭТИ" им.В.И.Ульянова (Ленина)" (СПбГЭТУ) (RU). "Программа для автоматизированного проектирования индукционных тигельных печей (SAPR_ИТР)". Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – М.: ФГУ ФИПС, 2010.– №3. – С. 410.
8. Рег. номер 2011614252 (30.05.2011). Авторы: Позняк И.В., Шатунов А.Н., Печенков А.Ю., Кичигин В.В., Максимов А.И., Максименко М.Ю.. (RU). Правообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский электротехниче-

ский университет “ЛЭТИ” им.В.И.Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ) (RU).
“Программа для расчета теплового состояния ванны расплава при зонной
плавке в индукционной печи с холодным тиглем (Z-Melt)”. Официальный
бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, па-
тентам и товарным знакам. Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии
интегральных микросхем. – М.: ФГУ ФИПС, ОБПБТ № 3(76) 20.09.2011.
С. 374-375.