

УДК 537.84

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГЕОМЕТРИИ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА КРЕМНИЯ

С. М. Карабанов, д.т.н, профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0003-3887-7062, e-mail: smkarabanov@gmail.com

Д. В. Суворов, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0002-5118-5688, e-mail: dmitriy_suvorov@mail.ru

Е. В. Сливкин, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0001-9906-8934, e-mail: e.slivkin@mail.ru

Д. Ю. Тарабрин, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0003-0844-9032, e-mail: tarabrin-dmitriy@mail.ru

А. С. Карабанов, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0002-9221-8837

Г. П. Гололобов, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ, РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0002-3611-729X, e-mail: gololobov.gennady@yandex.ru

Целью данной работы является сравнительная оценка эффективности различных систем магнитогидродинамического перемешивания расплава в применении к промышленной установке направленной кристаллизации типа GT-DSS-450 с форм-фактором тигля G5. В работе с использованием численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics® выполнен анализ эффективности различных типов геометрии системы индукторов для реализации магнитогидродинамического перемешивания расплава кремния. Представлены основные количественные параметры различных вариантов конфигураций систем индукторов, выполнено сопоставление их преимуществ и недостатков. Полученные результаты могут быть использованы при создании систем магнитогидродинамического перемешивания расплава кремния и электропроводящих расплавов веществ.

Ключевые слова: мультикристаллический кремний, магнитогидродинамическое перемешивание, бегущее магнитное поле, индуктор, расплав, математическое моделирование.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-218-227

Введение

Мировой рынок фотоэлектрических систем является быстроразвивающимся и в период 2010-2021 годы стабильно рос порядка 24 % в год. Объем произведенных фотоэнергетических систем за 2020 год превысил 135 ГВт [1]. Более 95 % рынка приходится на долю фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе кремниевых пластин. Одним из ключевых этапов производственной цепочки производства кремниевых солнечных элементов является выращивание слитков кремния методом Чохральского (монокристаллические слитки) или методом направленной кристаллизации (поликристаллические слитки). Именно качество кристаллических слитков кремния, содержание в нем примесей и дефектов, однородность распределения легатуры, наличие внутренних термомеханических напряжений во многом определяют итоговый уровень качества солнечных элементов, их КПД и срок эксплуатации.

К числу основных факторов, влияющих на качество слитков кремния относятся процессы тепло- и массообмена внутри расплава кремния при выращивании слитка. Массообмен внутри расплава происходит под действием сил тепловой конвекции и конвекции Маранго-ни, определяется, как правило, только условиями теплообмена расплава с внешней средой и потому слабо поддается управлению обычными методами. Так, типовая скорость движения расплава при выращивании поликристаллических слитков методом направленной кристаллизации в промышленных установках невелика и составляет не более 3-4 мм/с [2]. Увеличение

скорости тепло- и массообмена внутри расплава кремния до 15-30 мм/с при выращивании поликристаллических слитков приводит к улучшению внутренней структуры за счет подавления конкурентного роста на боковых стенках и выравнивания фронта кристаллизации [3-12]. В случае роста монокристаллических слитков в результате значительных температурных градиентов максимальное значение скорости массопереноса согласно [13] может составлять 20-100 мм/с. Столь высокие значения скорости массообмена являются вредными, поскольку приводят к увеличению концентрации кислорода в слитках, источником которого в технологическом процессе роста является кварцевый тигель, а механизмом поступления – диффузия кислорода через защитное покрытие в расплав кремния и интенсивный массообмен. В данном случае необходимо замедление скорости массообмена за счет формирования противоположно направленного компенсирующего поля сил.

Для управления качеством выращиваемых кристаллов кремния необходимо обеспечить интенсивный и управляемый массообмен в расплаве кремния и, в особенности, на границе расплав-кристалл. Наиболее подходящим и фактически единственным методом обеспечения интенсивного и управляемого массо- и теплообмена в электропроводящих расплавах, к которым относится также расплав кремния, является магнитогидродинамическое (МГД) перемешивание расплава. Этот метод имеет ряд ключевых преимуществ: отсутствие какого-либо механического контакта с высокочистым расплавом кремния, что обеспечит сохранение высокой чистоты расплава кремния в процессе роста; возможность управления интенсивностью и направлением тепломассопереноса, возможность управления формой потоков в объеме расплава кремния и вблизи фронта кристаллизации.

Для реализации магнитогидродинамического управления тепломассопереносом внутри расплава используются как стационарные, так и нестационарные (переменные) магнитные поля. На рисунке 1 приведены типы магнитных полей, которые могут быть использованы при выращивании кристаллов, а также их схематичные изображения.

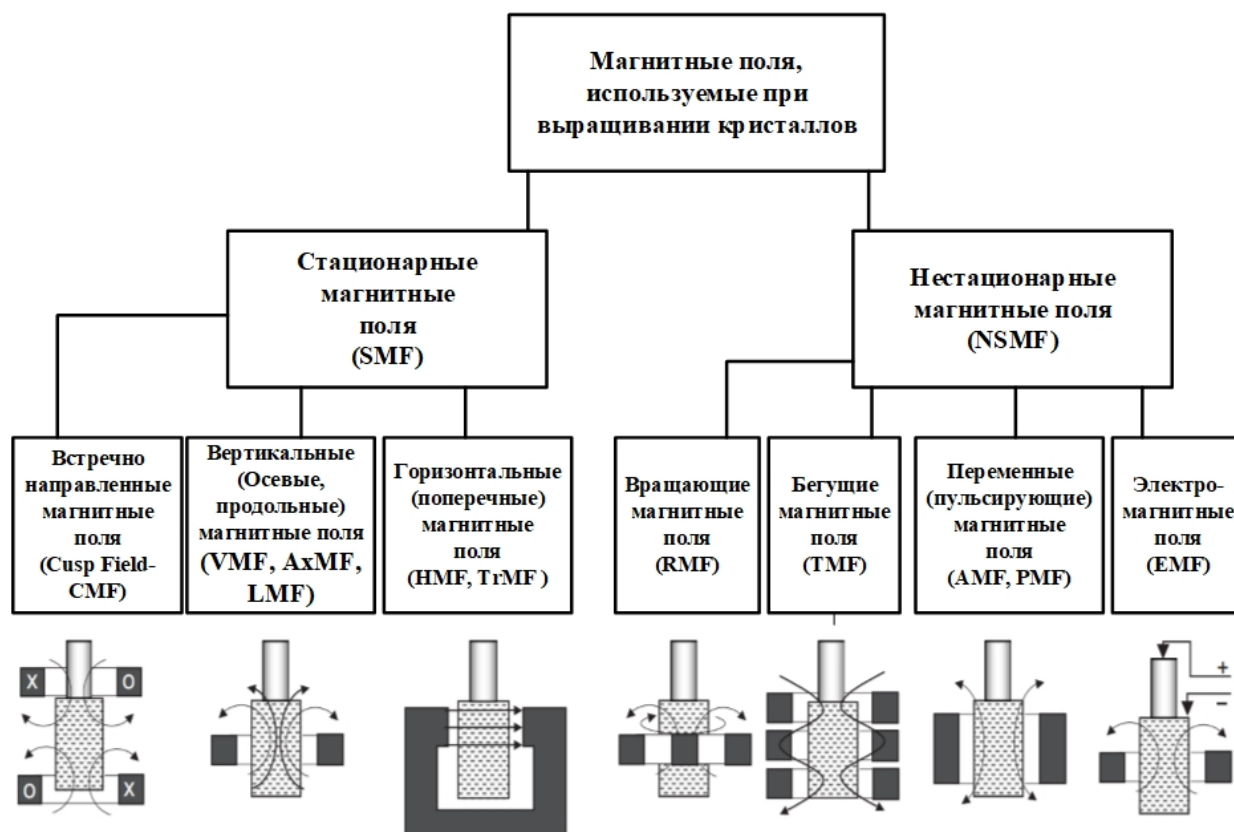


Рисунок 1 – Схематичные изображения различных типов магнитных полей, которые могут быть использованы при выращивании кристаллов
Figure 1 – Schematic images of different types of magnetic fields used in crystal cultivation

Черные квадраты обозначают магнитные катушки. Стрелками показаны направления линий магнитного поля. Штриховые линии представляют собой проводящий расплав. Растущие кристаллы показаны как серые цилиндры [5]

Применение магнитных полей при выращивании кристаллов электропроводящих материалов известно сравнительно давно [5-12]. В работе [14] впервые описан рост кристаллов Si методом Чохральского, с применением поперечного магнитного поля (SMF). Как показывают исследования, стационарные магнитные SMF поля имеют возможность эффективно нивелировать естественные конвекционные потоки. Вращающиеся магнитные поля (RMF) способны эффективно влиять на процесс перемешивания расплава [15]. Движущиеся или бегущие магнитные поля (TMF) [16] представляют особый интерес для воздействия на диффузионный граничный слой (AMF [17]), потоки Марангони [18] и кривизну фронта кристаллизации (TMF [19,20]). Таким образом, магнитные поля имеют широкий диапазон применимости в процессах выращивания кристаллов различных материалов, в том числе кремния. Помимо контроля термодинамических параметров, таких как температура и давление, кинематических (вращение, ускорение и вибрация), электрических (поляризация) использование магнитных полей может применяться для улучшения качества кристалла в процессе выращивания.

Критически важным параметром систем МГД-управления массообменом является энергетическая эффективность, которая определяет энергию затрачиваемой МГД-системой для обеспечения заданной скорости направленного движения внутри расплава. Для систем МГД-перемешивания высокотемпературных расплавов (температура расплава 1400 °C и более) характерно наличие значительного расстояния между расплавом и индукторами, обусловленное большой толщиной слоя теплоизоляции и футеровки. Это приводит к слабой электромагнитной связи между индукторами и короткозамкнутым витком тока, который представляет собой расплав. Согласно эквивалентной схеме замещения это приводит к образованию большой индуктивности рассеяния вторичной обмотки, величина которой в несколько раз выше индуктивности намагничивания первичной обмотки, то есть фактически собственной индуктивности индукторов. Согласно этому, практически вся потребляемая энергия будет расходоваться на омический нагрев проводников индукторов и определяться их электрическим сопротивлением и током через них. Таким образом, при оценке энергетической эффективности системы МГД-перемешивания выполнялось сопоставление максимальной скорости перемешивания при идентичной величине магнитодвижущей силы в индукторах току в индукторе при одинаковом числе витков для различных систем индукторов систем МГД-перемешивания.

Энергетическая эффективность будет напрямую определять целесообразность её применения. В данной работе методом математического моделирования выполнена сравнительная оценка эффективности различных систем магнитогидродинамического перемешивания в применении к промышленной установке направленной кристаллизации типа GT-DSS-450 с форм-фактором тигля G5.

Типы геометрии МГД-индукторов и условия математического моделирования

Расчет процесса МГД-перемешивания проводящих расплавов веществ под действием переменных магнитных полей является сложной задачей. Для ее решения используется метод математического моделирования. Сложность определяется необходимостью самосогласованного одновременного расчета различных физических процессов: переменного магнитного поля и его взаимодействия с проводящей движущейся средой и проводящими элементами конструкции и расчета собственно гидродинамики движения расплава кремния на которую воздействуют сила Лоренца, силы вязкого трения и силы инерции. Подробно основные особенности разработанной численной модели магнитогидродинамического перемешивания, реализованная в среде мультифизического моделирования (COMSOL Multiphysics), представлены в нашей ранней работе [21].

Основные аксиально-симметричные конфигурации геометрий индукторов для МГД-перемешивания, рассмотренные в данной работе, представлены на рисунках 2 и 3. Высота расплава кремния составляла 290 мм, диаметр тигля – 840 мм, внутренний диаметр вакуумной камеры – 1840 мм, что соответствует форм-фактору тигля стандарта G5.

На рисунке 2 представлено два варианта геометрий кольцевых индукторов различных реализаций (аксиально-симметричных). Кольцевые индукторы-нагреватели, выполненные из графита (рисунок 2, а), располагаются в «горячей» зоне рабочей камеры, под теплоизоляционной защитой, поскольку они выполняют две функции – поддержание рабочего температурного режима и формирование переменного магнитного поля. Такой способ совмещённого нагрева-перемешивания представлен в работе [7]. Медные кольцевые индукторы (рисунок 2, б) должны располагаться в холодной зоне рабочей камеры для обеспечения нормального температурного режима индукторов.

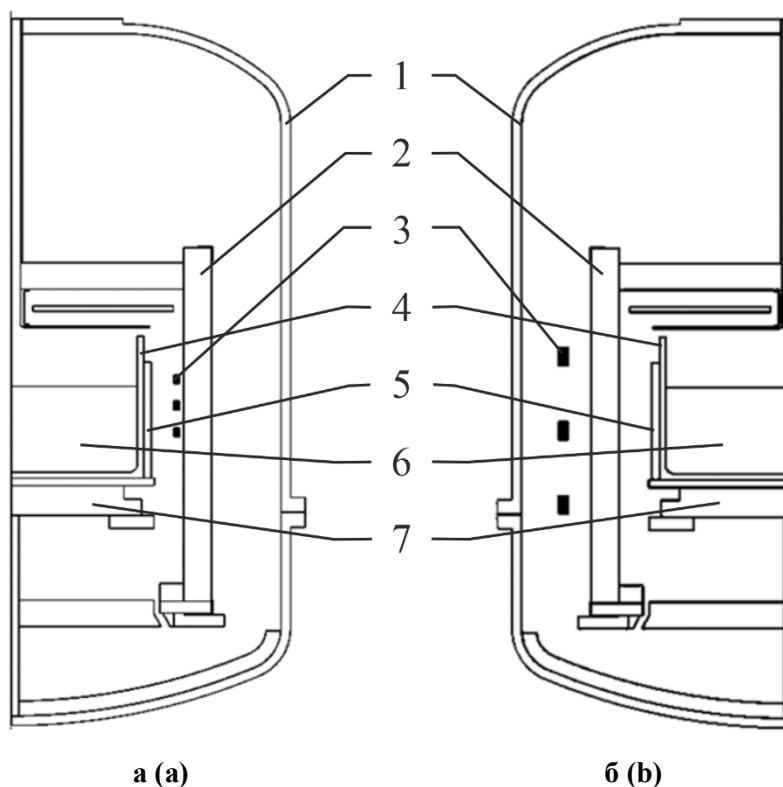


Рисунок 2 – Геометрии аксиально-симметричных моделей с кольцевыми индукторами:
 а – графитовые кольцевые индукторы-нагреватели (условное обозначение – М1), диаметр – 550 мм, высота системы индукторов – 200 мм, б – кольцевые медные индукторы (условное обозначение – М2), диаметр – 750 мм, высота системы индукторов – 550 мм.
 1 – корпус вакуумной камеры, 2 – теплоизоляция, 3 – индукторы МГД-перемешивания, 4 – кварцевый тигель, 5 – обклад тигля, 6 – расплав кремния, 7 – стол тигля

Figure 2 – Geometries of axially symmetric models with ring inductors:
 а – graphite ring inductors-heaters (symbol - M1), diameter – 550 mm, inductor system height – 200 mm, б – ring copper inductors (conditional designation – M2), diameter – 750 mm, inductor system height – 550 mm. 1 – vacuum chamber, 2 – thermal insulation, 3 – MHD mixing inductors, 4 – quartz crucible, 5 – crucible plate, 6 – silicon melt, 7 – crucible table

Магнитное поле кольцевых индукторов направленно имеет конфигурацию, распространяющуюся как внутрь кольца в область расплава, так и наружу, взаимодействуя со стенками вакуумной камеры, что может стать причиной уменьшения энергетической эффективности перемешивания. На рисунке 3 представлены варианты геометрии кольцевых индукторов с ферромагнитными сердечниками для осесимметричного вертикального перемешивания расплава кремния. Каждый индуктор состоит из двух полуобмоток, имеющих кольцевую форму, направление токов во внешней и внутренней полуобмотках противоположное.

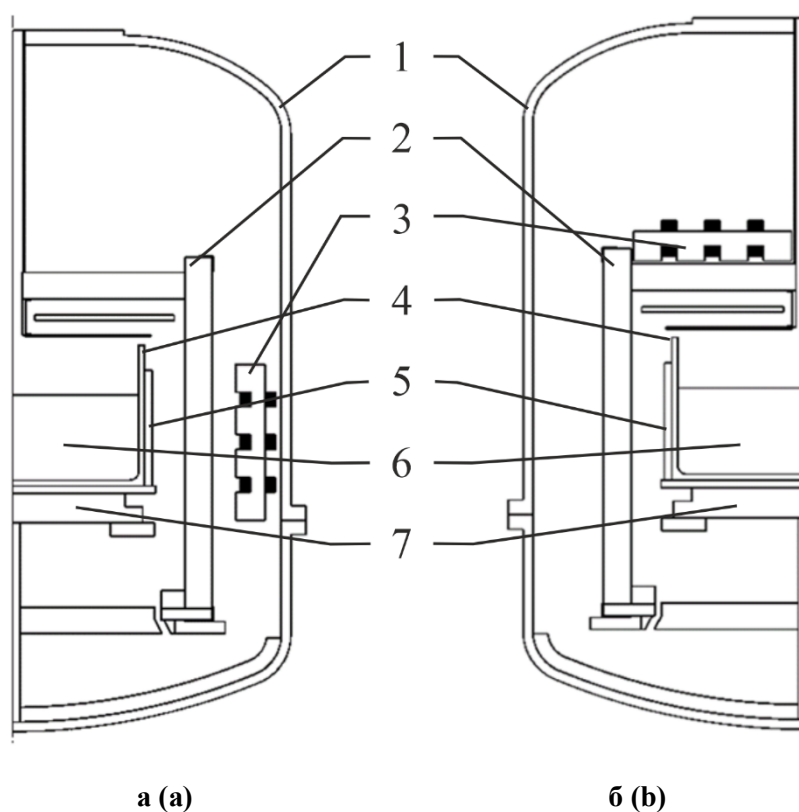


Рисунок 3 – Геометрии аксиально-симметричных моделей с линейными индукторами с ферромагнитными сердечниками: а – индукторы расположены сбоку от расплава (условное обозначение – М3), средний диаметр – 750 мм, высота системы индукторов – 520 мм, толщина – 100 мм, б – индукторы расположены сверху (условное обозначение – М4), внешний диаметр – 570 мм, толщина – 100 мм. 1 – корпус вакуумной камеры, 2 – теплоизоляция, 3 – индукторы МГД-перемешивания, 4 – кварцевый тигель, 5 – обклад тигля, 6 – расплав кремния, 7 – стол тигля

Figure 3 – Geometries of axially symmetric models with linear inductors with ferromagnetic cores: а – inductors are located on the side of a melt (standard designation – М3), average diameter – 750 mm, inductor system height – 520 mm, thickness – 100 mm, б – inductors are located on top (standard designation – М4), outer diameter – 570 mm, thickness – 100 mm. 1 – vacuum chamber, 2 – thermal insulation, 3 – MHD mixing inductors, 4 – quartz crucible, 5 – crucible plate, 6 – silicon melt, 7 – crucible table

При исследовании МГД-перемешивания расплава кремния с использованием различных конфигураций индукторов величина магнитодвижущей силы единичного индуктора (средне-квадратичное значение) оставалась фиксированной (2000 ампер-витков), а такие параметры, как частота тока f (10-200 Гц), фазовый сдвиг ϕ (0-120°) и линейные размеры между индукторами варьировались для обеспечения аксиальной интенсивности перемешивания, с учетом геометрических и конструктивных ограничений. Искомыми параметрами в ходе исследования были величина магнитной индукции внутри расплава кремния, величина средней силы Лоренца, величина скорости движения расплава кремния. Наиболее важным искомым параметром МГД-перемешивания является максимальная величина скорости расплава кремния на поверхности.

Результаты моделирования и обсуждение полученных результатов

На рисунке 4 представлен пример полученных распределений скорости кремния в объеме и на поверхности расплава.

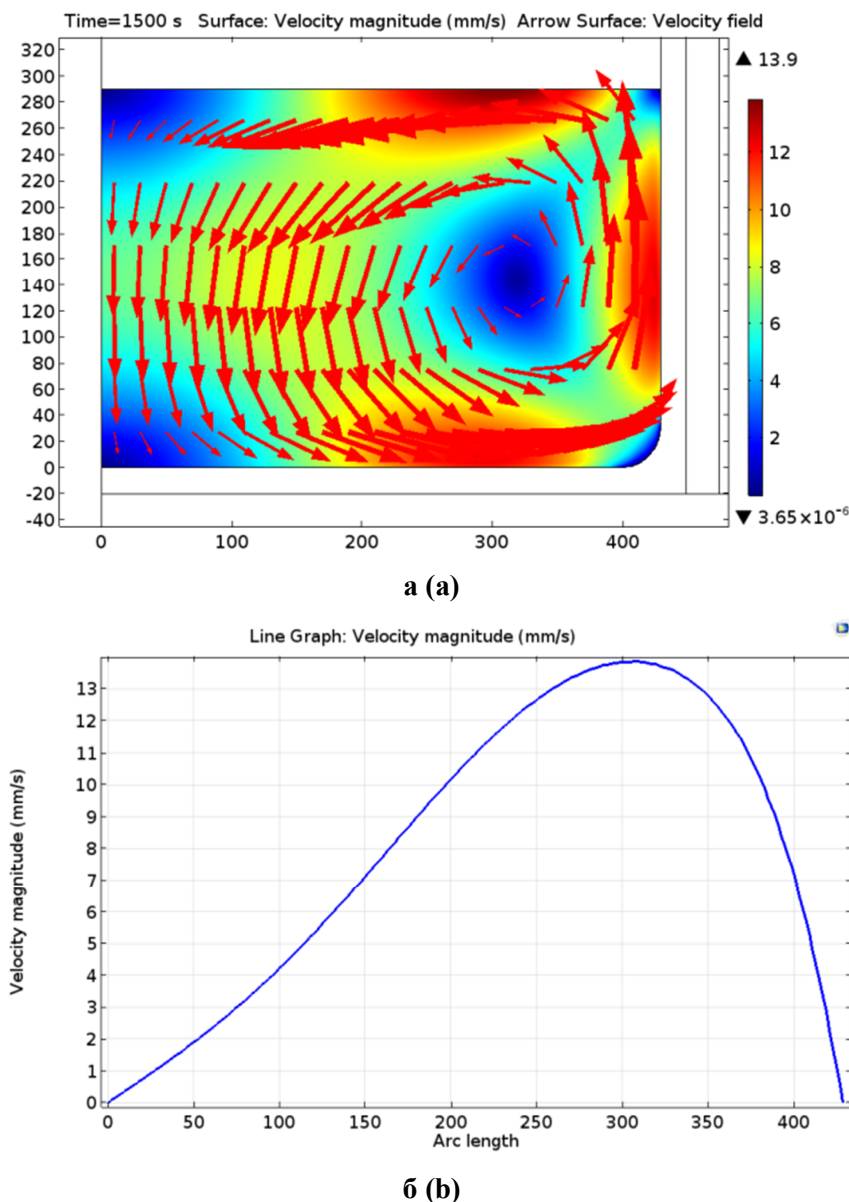


Рисунок 4 – Результаты моделирования осесимметричного МГД-перемешивания расплава кремния в системе трех кольцевых индукторов-нагревателей, расположенных вокруг тигля, при базовых исходных параметрах: а – скорость расплава в объеме, б – скорость расплава на поверхности, velocity magnitude – скорость движения расплава, arc length – расстояние от края тигля

Figure 4 – Simulation results of axisymmetric MHD mixing of silicon melt in a system of three ring inductors-heaters located around a crucible, with basic initial parameters: a – melt velocity in volume, b – melt velocity on the surface

Для анализа влияния различных параметров на характеристики осесимметричного, линейного и вращательного МГД-перемешивания были построены зависимости максимальной величины индукции магнитного поля внутри расплава кремния, максимальной величины средней нормированной силы Лоренца и максимальной скорости на поверхности расплава кремния от частоты, силы тока и расстояния между индукторами.

Анализ полученных зависимостей показывает, что частота тока сильно влияет на скорость расплава кремния на поверхности. Практически для всех конфигураций геометрии индукторов данная зависимость имеет максимальные значения, соответствующие частоте 50-200 Гц, несмотря на то, что величина магнитной индукции внутри расплава кремния и сила Лоренца с увеличением частоты растут. Это связано с тем, что на малых частотах (менее 20 Гц) глубина проникновения магнитного поля внутрь расплава высока, в результате чего

сила Лоренца распределяется по объему расплава вплоть до осевой линии. В результате сила Лоренца вблизи осевой линии направлена противоположно направлению движения расплава и скорость движения уменьшается. Спад максимальной величины скорости на поверхности расплава на высоких частотах выше 200 Гц обусловлен слишком малой глубиной проникновения магнитного поля в расплав. Сила Лоренца в данном случае воздействует на расплав кремния лишь в приграничном слое, что отрицательно влияет на эффективность перемешивания. Магнитная индукция внутри расплава кремния определяется взаимодействием магнитной индукции поля индукторов (внешнее поле) и магнитной индукции наведенного в расплаве тока самоиндукции. Так, с увеличением частоты внешнего поля глубина проникновения поля уменьшается и плотность тока самоиндукции возрастает, что в свою очередь вызывает рост локальной магнитной индукции, а соответственно и силы Лоренца.

Увеличение амплитуды тока, протекающего в каждом индукторе, позволяет увеличить скорость перемешивания в любой конфигурации индукторов. Фактором, ограничивающим амплитуду тока могут быть тепловой режим (для индукторов в холодной зоне) и максимальная величина тока, определяющая тепловой режим в горячей зоне (для индукторов-нагревателей).

Изменение расстояния между индукторами относительно базового значения, принятого за 100 %, в большинстве конфигураций индукторов позволяет оптимизировать эффективность перемешивания. С увеличением расстояния между индукторами максимальная скорость на поверхности расплава растет. Это связано с увеличением эффективной площади воздействия переменного магнитного поля на расплав кремния. Результаты моделирования различных типов геометрии индукторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные характеристики различных типов геометрии индукторов системы МГД-перемешивания

Table 1 – Generalized characteristics of different inductors geometry types of MHD-mixing system

Параметры системы МГД-перемешивания	Тип геометрии индукторов			
	Три кольцевых индуктора-нагревателя, расположенные вокруг тигля в горячей зоне (М1)	Три кольцевых медных индуктора, расположенные вокруг тигля в холодной зоне (М2)	Индукторы с ферромагнитными сердечниками, расположенными сбоку от тигля в холодной зоне (М3)	Индукторы с ферромагнитными сердечниками, расположенными над расплавом кремния в холодной зоне (М4)
Магнитодвижущая сила в индукторе (среднеквадр. значение), А	2000	2000	2000	2000
Средняя нормированная величина магнитной индукции в расплаве, мТл	0,62	1,35	3,14	1,45
Максимальная величина скорости на поверхности расплава кремния, мм/с	20	38	96	33
Оптимальная частота, Гц	50-200	50-100	50-200	200
Ориентировочная масса, кг	≈ 50	≈ 210	≈ 2000	≈ 850
Ориентировочная потр. мощность, кВт	≈ 50	≈ 5	≈ 5	≈ 5

Заключение

Сопоставление характеристик различных типов геометрии индукторов системы МГД-перемешивания показывает, что наибольшей эффективностью обладает геометрия индукторов с ферромагнитными сердечниками, расположенными сбоку от тигля в холодной зоне (М3). При прочих равных условиях достигаемая скорость МГД-перемешивания более чем в два раза превышает скорость для геометрии кольцевых индукторов, расположенных вокруг

тигля в холодной зоне (M2). Это обусловлено значительным перераспределением конфигурации индукции магнитного поля внутрь, в сторону тигля, за счет магнитопровода. Геометрия кольцевых индукторов занимает второе место по эффективности, и скорость движения расплава для данной геометрии в 1,5-2 раза превышает скорость движения расплава для других рассмотренных типов геометрий M1 и M4. Однако массогабаритные параметры системы индукторов с медными кольцевыми индукторами значительно ниже, чем у системы МГД-перемешивания с ферромагнитными сердечниками.

Поэтому, несмотря на несколько меньшую эффективность, применение кольцевых медных индукторов, расположенных вокруг тигля в холодной зоне (M2), имеющих существенно меньшие массогабаритные характеристики по сравнению с системой индукторов с ферромагнитными сердечниками, представляется наиболее целесообразным. Таким образом, для обеспечения эффективного МГД-перемешивания расплавов большой массы наиболее пригодными являются индукторы на основе медных труб, которые обладают большей универсальностью, простотой изготовления, меньшими требованиями к обслуживанию и высокой гибкостью управления МГД-перемешиванием расплава кремния.

Библиографический список

1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaics report 2021. ISE with support of PSE Projects GmbH.
2. **Сливкин Е. В.** Экспериментальное исследование скорости движения расплава кремния в условиях магнитогидродинамического перемешивания // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 211-220.
3. **Q. Yu, L. Liu, Z. Li, Y. Shao** Parameter study of traveling magnetic field for control of melt convection in directional solidification of crystalline silicon ingots // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018. Vol. 71. Pp. 55-67.
4. **Rudolph P.** Travelling magnetic fields applied to bulk crystal growth from the melt: The step from basic research to industrial scale // Journal of Crystal Growth. 2008. Vol. 310. No. 7-9. Pp. 1298-1306.
5. **Rudolph P., Kakimoto K.** Crystal Growth from the Melt under External Force Fields // MRS Bulletin. 2009. Vol. 34. № 4. Pp. 251-258.
6. **Dropka N., Miller W., Menzel R., Rehse U.** Numerical study on transport phenomena in a directional solidification process in the presence of travelling magnetic fields // Journal of Crystal Growth. 2010. Vol. 312. No. 8. P. 14071410
7. **Rudolph P., Czupalla M., Dropka N., Frank-Rotsch C., Kiessling F.-M., Klein O., Lux B., Miller W., Rehse U., Root O.** Crystal growth from melt in combined heater-magnet modules // Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology. 2009. Vol. 19. Pp. 215-222.
8. **Dropka N., Frank-Rotsch C., Rudolph P.** Comparison of stirring efficiency of various non-steady magnetic fields during unidirectional solidification of large silicon melts // Journal of Crystal Growth. 2013. Vol. 365. Pp. 64-72.
9. **Karabanov S. M., Suvorov D. V., Tarabrin D. Yu., Slivkin E. V., Serebryakov A. E., Klimakov V. V., Karabanov A. S., Belyakov O. A.** Study of the Temperature Influence on the Efficiency of Silicon Vacuum Refining under Electromagnetic Stirring // Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2019. Pp. 1-5.
10. **Karabanov S. M., Suvorov D. V., Tarabrin D. Yu., Slivkin E. V., Serebryakov A. E., Klimakov V. V., Karabanov A. S., Belyakov O. A.** Mathematical modeling of vacuum refining of silicon melt under the conditions of electromagnetic stirring // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1999. Pp. 1-8.
11. **Pfann W. G., Dorsi D.** Magnetic stirring technique // Review of Scientific Instruments. 1957. Vol. 28. No. 9. Pp. 720.
12. **Pfann W. G., Hagelbarger D. W.** Electromagnetic suspension of a molten zone // Journal of Applied Physics. 1956. Vol. 27. No. 1. Pp. 12-18.
13. **Zhao W., Li J., Liu L.** Control of Oxygen Impurities in a Continuous-Feeding Czochralski-Silicon Crystal Growth by the Double-Crucible Method. Crystals 2021, 11, 264.
14. **Suzuki T., Isawa N., Okubo Y., Hoshi K. in Huff H.R., Kriegler R.J., Takeishi Y. (Eds.),** Semiconductor Silicon 1981. Electrochemical Society, Pennington, NJ, 1981
15. **Croll A., Szofran F. R., Dold P., Benz K. W., Lehoczky S. L.** Floating-zone growth of silicon in magnetic fields II. Strong static axial fields // Journal of Crystal Growth. 1998. Vol. 183. No. 4. Pp. 554-563.

16. **Ono N., Trapaga G.** A numerical study of the effects of electromagnetic stirring on the distributions of temperature and oxygen concentration in silicon double-crucible Czochralski processing // Journal of the Electrochemical Society. 1997. Vol. 144. No. 2. Pp. 764-772.
17. **Mitric A., Duffar T., Diaz-Guerra C., Corregidor V., Alves L.C., Garnier C., Vian G.** Growth of Ga(1-x)InxSb alloys by Vertical Bridgman technique under alternating magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2006. Vol. 287. No. 2. Pp. 224-229.
18. **Galindo V., Gerbeth G., Von Ammon W., Tomzig E., Virbulis J.** Proceedings of the Fourth International PAMIR Conference on Magnetohydrodynamics at Dawn of Third Millenium, Presq'ile de Giens, France, 2000, p. 725.
19. **Schwesig P., Hainke M., Friedrich J., Mueller G.** Comparative numerical study of the effects of rotating and travelling magnetic fields on the interface shape and thermal stress in the VGF growth of InP crystals // Journal of Crystal Growth. 2004. Vol. 266. No. 1-3. Pp. 224-228.
20. **Yesilyurt S., Motakef S., Grugel R., Mazuruk K.** The effect of the traveling magnetic field (TMF) on the buoyancy-induced convection in the vertical Bridgman growth of semiconductors // Journal of Crystal Growth. 2004. Vol. 263. No. 14. Pp. 80-89.
21. **Karabanov S. M., Yasevich V. I., Suvorov D. V., Karabanov A. S.** Mathematical modeling and experimental research of the method of plasma chemical purification of metallurgical-grade silicon. IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) (2016), pp. 949-953.

UDC 537.84

EFFICIENCY ANALYSIS OF VARIOUS TYPES OF INDUCTOR GEOMETRIES FOR MAGNETOHYDRODYNAMIC MIXING OF SILICON MELT

S. M. Karabanov, Dr. Sc. (Tech.), professor of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org / 0000-0003-3887-7062, e-mail: smkarabanov@gmail.com

D. V. Suvorov, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org / 0000-0002-5118-5688, e-mail: dmitriy_suvorov@mail.ru

E. V. Slivkin, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org / 0000-0001-9906-8934, e-mail: e.slivkin@mail.ru

D. Y. Tarabrin, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org / 0000-0003-0844-9032, e-mail: tarabrin-dmitriy@mail.ru

A. S. Karabanov, Ryazan, Russia;
orcid.org/ 0000-0002-9221-8837

G. P. Gololobov, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/ 0000-0002-3611-729X, e-mail: gololobov.gennady@yandex.ru

The aim of this work is a comparative efficiency evaluation of various systems for magneto-hydro-dynamic melt mixing in the application to industrial installation of directional crystallization type GT-DSS-450 with a form factor of crucible G5. In this work, using numerical simulations in the COMSOL Multiphysics® software, the efficiency of various types of inductor system geometries was analyzed for the application of magneto-hydro-dynamic mixing of a silicon melt for the conditions of industrial plants for growing multicrystalline silicon ingots. The main quantitative parameters of various configurations of inductor systems are presented, their advantages and disadvantages are compared. The results obtained can be used to create systems for magneto-hydro-dynamic mixing of silicon melt and electrically conductive melts of substances.

Key words: multicrystalline silicon, magnetohydrodynamic mixing, traveling magnetic field, inductor, melt, mathematical modeling.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-218-227

References

1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. *Photovoltaics report 2021*. ISE with support of PSE Projects GmbH.

3. **Q. Yu, L. Liu, Z. Li, Y. Shao** Parameter study of traveling magnetic field for control of melt convection in directional solidification of crystalline silicon ingots. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018, vol. 71, pp. 55-67.
4. **Rudolph P.** Travelling magnetic fields applied to bulk crystal growth from the melt: The step from basic research to industrial scale. *Journal of Crystal Growth*. 2008, vol. 310, no. 7-9, pp. 1298-1306.
5. **Rudolph P., Kakimoto K.** Crystal Growth from the Melt under External Force Fields. *MRS Bulletin*. 2009, vol. 34, no. 4, pp. 251-258.
6. **Dropka N., Miller W., Menzel R., Rehse U.** Numerical study on transport phenomena in a directional solidification process in the presence of travelling magnetic fields. *Journal of Crystal Growth*. 2010, vol. 312, no. 8, pp. 14071410
7. **Rudolph P., Czupalla M., Dropka N., Frank-Rotsch C., Kiessling F.-M., Klein O., Lux B., Miller W., Rehse U., Root O.** Crystal growth from melt in combined heater-magnet modules. *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*. 2009, vol. 19, pp. 215-222.
8. **Dropka N., Frank-Rotsch C., Rudolph P.** Comparison of stirring efficiency of various non-steady magnetic fields during unidirectional solidification of large silicon melts. *Journal of Crystal Growth*. 2013, vol. 365, pp. 64-72.
9. **Karabanov S. M., Suvorov D. V., Tarabrin D. Yu., Slivkin E. V., Serebryakov A. E., Klimakov V. V., Karabanov A. S., Belyakov O. A.** Study of the Temperature Influence on the Efficiency of Silicon Vacuum Refining under Electromagnetic Stirring. *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*. 2019, pp. 1-5.
10. **Karabanov S. M., Suvorov D. V., Tarabrin D. Yu., Slivkin E. V., Serebryakov A. E., Klimakov V. V., Karabanov A. S., Belyakov O. A.** Mathematical modeling of vacuum refining of silicon melt under the conditions of electromagnetic stirring. *AIP Conference Proceedings*. 2018, vol. 1999, pp. 1-8.
11. **Pfann W. G., Dorsi D.** Magnetic stirring technique. *Review of Scientific Instruments*. 1957, vol. 28, no. 9, pp. 720.
12. **Pfann W. G., Hagelbarger D. W.** Electromagnetic suspension of a molten zone // *Journal of Applied Physics*. 1956, vol. 27, no. 1, pp. 12-18.
13. **Zhao W., Li J., Liu L.** Control of Oxygen Impurities in a Continuous-Feeding Czochralski-Silicon Crystal Growth by the Double-Crucible Method. *Crystals* 2021, 11, 264.
14. **Suzuki T., Isawa N., Okubo Y., Hoshi K. in Huff H.R., Kriegler R.J., Takeishi Y. (Eds.),** Semiconductor Silicon 1981. *Electrochemical Society*, Pennington, NJ, 1981
15. **Croll A., Szofran F. R., Dold P., Benz K. W., Lehoczky S. L.** Floating-zone growth of silicon in magnetic fields II. Strong static axial fields. *Journal of Crystal Growth*. 1998, vol. 183, no. 4, pp. 554-563.
16. **Ono N., Trapaga G.** A numerical study of the effects of electromagnetic stirring on the distributions of temperature and oxygen concentration in silicon double-crucible Czochralski processing. *Journal of the Electrochemical Society*. 1997, vol. 144, no. 2, pp. 764-772.
17. **Mitric A., Duffar T., Diaz-Guerra C., Corregidor V., Alves L.C., Garnier C., Vian G.** Growth of Ga(1-x)InxSb alloys by Vertical Bridgman technique under alternating magnetic field. *Journal of Crystal Growth*. 2006, vol. 287, no. 2, pp. 224-229.
18. **Galindo V., Gerbeth G., Von Ammon W., Tomzig E., Virbulis J.** *Proceedings of the Fourth International PAMIR Conference on Magnetohydrodynamics at Dawn of Third Millenium*, Presq'ile de Giens, France, 2000, p. 725.
19. **Schwesig P., Hainke M., Friedrich J., Mueller G.** Comparative numerical study of the effects of rotating and travelling magnetic fields on the interface shape and thermal stress in the VGF growth of InP crystals. *Journal of Crystal Growth*. 2004, vol. 266, no. 1-3, pp. 224-228.
20. **Yesilyurt S., Motakef S., Grugel R., Mazuruk K.** The effect of the traveling magnetic field (TMF) on the buoyancy-induced convection in the vertical Bridgman growth of semiconductors // *Journal of Crystal Growth*. 2004, vol. 263, no. 14, pp. 80-89.
21. **Karabanov S. M., Yasevich V. I., Suvorov D. V., Karabanov A. S.** Mathematical modeling and experimental research of the method of plasma chemical purification of metallurgical-grade silicon. *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2016, pp. 949-953.