
2.2. ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

*ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ
И ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
(2.2.3)*

*МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ
И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ (2.6.2)*

УДК 537.84

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-145-154

Математическая модель плазмотермической очистки расплава кремния в условиях магнитогидродинамического перемешивания

С.М. Карабанов, Д.В. Суворов, Д.Ю. Тарабрин, Е.В. Сливкин, А.С. Карабанов, Г.П. Гололобов

Представлены результаты математического моделирования плазмотермической очистки расплава кремния в условиях магнито-гидродинамического перемешивания расплава. Детально рассмотрен процесс удаления примесей трудноудаляемых вакуумным рафинированием примесей Al, Ca, Cu, Mg. Показано, что в области горячих пятен обеспечиваются условия для эффективного удаления данных примесей. Приведены зависимости между максимальной температурой в области пятна плазмотермического воздействия на расплав, диаметром пятна и мощностью теплового потока. Результаты выполненных исследований использованы при разработке технологии очистки кремния и проектировании установок для реализации данного процесса.

Ключевые слова: магнитогидродинамическое перемешивание, плазмотермическая очистка, кремний, математическое моделирование.

Для цитирования: Карабанов С.М., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Сливкин Е.В., Карабанов А.С., Гололобов Г.П. Математическая модель плазмотермической очистки расплава кремния в условиях магнитогидродинамического перемешивания // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 145—154. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-145-154.

The Mathematical Model of Silicon Melt Plasma-Thermal Purification under Magnetohydrodynamic Stirring Conditions

S.M. Karabanov, D.V. Suvorov, D.Yu. Tarabrin, E.V. Slivkin, A.S. Karabanov, G.P. Gololobov

The results of mathematically modeling the plasma-thermal purification of a silicon melt under the conditions of its magnetohydrodynamic stirring are presented. The process of removing Al, Ca, Cu, and Mg impurities, which are poorly amenable to removal by vacuum refining, is considered in detail. It is shown that in the hot spot area, conditions for efficient removal of these impurities are ensured. The dependences

between the maximum temperature in the spot of plasma-thermal action on the melt, the spot diameter, and the heat flux power are given. The results of the performed studies were used in elaborating the silicon purification technology and designing installations for implementing this process.

Key words: magnetohydrodynamic stirring, plasma-thermal purification, silicon, mathematical modeling.

For citation: Karabanov S.M., Suvorov D.V., Tarabrin D.Yu., Slivkin E.V., Karabanov A.S., Gololobov G.P. The Mathematical Model of Silicon Melt Plasma-Thermal Purification under Magnetohydrodynamic Stirring Conditions. Bulletin of MPEI. 2023;1:145—154. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-145-154.

Введение

В связи с динамичным развитием солнечной энергетики в настоящее время отмечается большая потребность в высокочистом кремнии, являющимся основным материалом в производстве солнечных элементов. Основным методом производства кремния для солнечных элементов — восстановление его из трихлорсилана (Siemens-процесс) или моносилана (технологии Union Carbide Corp.) [1, 3]. Данные технологии характеризуются использованием токсичных и взрывоопасных материалов (HCl , SiHCl_3 , SiH_4) [1]. Таким образом, на первый план выходит разработка экологически безопасных, экономически эффективных, масштабируемых методов очистки металлургического кремния до уровня SoG Si [1 — 3]. В части «бесхлорной» очистки металлургического кремния наиболее известны методы, основанные на направленной кристаллизации [4 — 6], обработке расплава кремния потоками газа, содержащими химически активные примеси [7 — 11], и вакуумного рафинирования расплава [12 — 14]. Общим для них является то, что очистка кремния от примесей происходит на границе раздела двух фаз.

Метод вакуумного рафинирования кремния основан на разнице давлений насыщенных паров кремния и содержащихся в нем примесей. При этом примеси, имеющие давление насыщенных паров выше, чем давление насыщенных паров кремния, эффективно испаряются с поверхности кремния. Достаточно высокая эффективность метода основана на том, что кремний является веществом со сравнительно низким давлением насыщенных паров по отношению к большинству химических элементов.

В процессе вакуумного рафинирования идут следующие физические процессы [12]:

- транспорт частиц примесей через объем расплава к пограничному слою вблизи «зеркала» расплава;
- перемещение частиц примесей через пограничный слой;
- испарение примесей с поверхности расплава — переход примеси в газовую фазу в приграничный слой вблизи поверхности расплава;
- транспорт примеси через пограничный приповерхностный слой газовой фазы в объем вакуумной камеры;
- перемещение примеси через объем вакуумной камеры к зоне конденсации или откачки;
- конденсация примеси или откачка примеси из объема вакуумной камеры.

Метод вакуумного рафинирования эффективен для очистки кремния от примесей с высоким давлением насыщенных паров при температуре выше температуры плавления кремния — прежде всего фосфора, цинка, щелочных металлов [1, 12 — 14], составляющих значительную часть примесей в металлургическом кремнии (таблица). При этом удаляемые вакуумным рафинированием примеси условно делят на легкоиспаряющиеся и примеси со средней скоростью испарения. К легкоиспаряющимся примесям относят: фосфор, натрий, цинк, которые при уже при температурах незначительно выше температуры плавления кремния достаточно интенсивно испаряются со всей поверхности расплава. К примесям со средней скоростью испарения причисляют примеси со средним давлением насыщенных паров при температуре плавления крем-

Требования стандарта SEMI PV17-0611 и данные о содержании примесей в металлургическом кремнии

Элемент	Требования стандарта SEMI PV17-0611 – Cat. IV	Металлургический кремний
Бор (B)	$\leq 0,38 \text{ ppmw} (\pm 0,06 \text{ ppmw})$	2...10 ppmw
Фосфор (P)	$\leq 0,79 \text{ ppmw} (\pm 0,17 \text{ ppmw})$	5...100 ppmw
Углерод (C)	$\leq 43 \text{ ppmw}$	1000 ppmw
Алюминий (Al)	$\leq 0,5 \text{ ppmw}$	900 ppmw
Переходные и постпереходные металлы (Fe, Ti, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo)	$\leq 200 \text{ ppba}$	Fe — 200...2000 ppmw Ti — 20...200 ppmw Cr — 10...200 ppmw Ni — 100...400 ppmw Cu — 20...100 ppmw
Щелочные и щелочноземельные металлы (Na, K, Ca)	$\leq 4000 \text{ ppba}$	Na — 1...10 ppmw K — 20...50 ppmw Ca — 4000 ppmw

ния — алюминий и кальций. Их эффективное удаление происходит при температурах существенно выше температуры плавления кремния (1600...1700 °C). Методу вакуумного рафинирования кремния посвящены публикации [12 — 14].

Плазмотермический метод очистки — модификация метода вакуумного рафинирования кремния. Ключевое отличие плазмотермической очистки состоит в создании на поверхности расплава области «горячих пятен» с локальным повышением температуры существенно выше температуры плавления кремния (1600...1700 °C), в которых происходит эффективная очистка. Области «горячих пятен» создаются локальным энергетическим воздействием на поверхность расплава с помощью плазмотронов. В ходе плазмотермической очистки легкоиспаряющиеся примеси удаляются со всей поверхности расплава, в том числе и из области «горячих пятен», а примеси со средней скоростью испарения — преимущественно из области «горячих пятен». Особенностью метода является то, что в процессе очистки также происходит испарение непосредственно кремния, особенно из областей локального повышения температуры, поэтому условия очистки должны быть оптимизированы таким образом, чтобы, во-первых, осуществлялась эффективная очистка кремния от примесей, и во-вторых, обеспечивались минимально возможные потери кремния при приемлемой длительности технологического процесса [15, 16].

В настоящей работе методом численного моделирования исследован процесс очистки расплава кремния плазмотермическим методом в условиях магнитогидродинамического (МГД) перемешивания расплава, что позволяет обрабатывать большие объемы кремния.

Математическая модель плазмотермической очистки кремния

В математическую модель плазмотермической очистки кремния в условиях МГД-перемешивания вошли уравнения процессов массопереноса примесей в объеме кремния, уравнения, описывающие транспорт тепла, гидродинамику несжимаемой жидкости и электромагнетизм.

Плазмотермическая очистка подразумевает создание необходимых условий, обеспечивающих эффективное удаление примесей с поверхности расплава кремния, прежде всего — определенного температурного режима, при котором частицы примесей испаряются в атмосферу, и эффективного перемешивания расплава кремния. Поскольку примеси удаляются непосредственно с поверхности расплава, важным фактором при очистке кремния является создание локального температурного градиента, который на практике формируется воздействием потока плазмы. Уравнения, описывающие процессы теплопередачи в расплаве кремния и на его границах, выглядят следующим образом:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \nabla T + \nabla q = Q_i; \quad q_i = -\lambda \nabla T; \quad q_s = \varepsilon \sigma T^4,$$

где ρ — плотность тела; c_p — теплоемкость; T — температура; \mathbf{u} — векторное поле скоростей жидкости; Q_i — источники тепла (плазмотермический нагрев); q — количество теплоты; λ — коэффициент теплопроводности; ε — степень черноты тела; σ — постоянная Стефана-Больцмана.

Уравнения включают в себя процессы передачи тепла за счет теплопроводности, массопереноса и излучения.

Движение потоков расплава кремния и массопереноса определяется уравнением Навье–Стокса, справедливым для всех несжимаемых жидкостей:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u}(\nabla \mathbf{u}) + \frac{\eta}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{F}_m,$$

и уравнением непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0.$$

Перенос частиц в объеме расплава кремния описывается уравнением диффузии:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla(-D_i \nabla c_i) + \mathbf{u} \nabla c_i = R_i,$$

где D_i , c_i — коэффициент диффузии и концентрация i -й примеси; \mathbf{u} — векторное поле скоростей, определяющее конвективную составляющую переноса частиц в объеме расплава кремния; R_i — скорость изменения концентрации, моль/с.

Поток i -й частицы примеси при условии полного удаления частиц примесей, находящихся на поверхности, может быть задан следующим выражением:

$$N_i = -\mathbf{n}(-D_i \nabla c_i + \mathbf{u} c_i),$$

где N_i — поток частиц i -й примеси, моль/(м²·с); \mathbf{n} — вектор нормали к поверхности.

Испарение частиц примеси с поверхности расплава кремния — сложный процесс, поскольку кремний в данном случае является растворителем для содержащихся в нем частиц примесей. Парциальное давление этих примесей снижается пропорционально их мольной доле в кремнии, что описывается первым законом Рауля:

$$\frac{p_{si}^0 - p_{si}}{p_{si}^0} = X_i,$$

где p_{si}^0 — давление насыщенных паров кремния; p_{si} — парциальное давление кремния; X_i — мольная доля i -й примеси в расплаве кремния.

Если давление насыщенного пара i -й примеси уменьшается пропорционально ее содержанию в рас-

плаве кремния, то отношение этих давлений представим как активность данной примеси в растворе [13]:

$$\frac{p_i^e}{p_i^0} = \gamma_i X_i,$$

где p_i^e — парциальное давление i -й примеси в расплаве кремния; p_i^0 — давление насыщенных паров i -й примеси в расплаве кремния; γ_i — коэффициент активности i -й примеси в расплаве кремния.

В [13] получено и описано соотношение, позволяющее найти коэффициент испарения примеси с поверхности расплава кремния:

$$K_{c,i} = \frac{\gamma_i M_{Si} p_i^0}{\rho_{Si} \sqrt{2\pi M_i R T}},$$

где $K_{c,i}$ — коэффициент испарения i -й примеси, м/с; γ_i — коэффициент активности; M_{Si} — молярная масса кремния; p_i^0 — давление насыщенных паров i -й примеси; ρ_{Si} — плотность жидкого кремния; M_i — молярная масса i -й примеси; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Таким образом, реальный поток i -й примеси с расплава кремния можно выразить следующим образом:

$$N_i = K_{c,i} c_i.$$

Для моделирования процесса плазмотермической очистки кремния следует определить коэффициенты испарения частиц $K_{c,i}$ основных примесей.

В ходе исследования рассмотрены следующие примеси: P, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, Na, Zn, Cu. При исследовании эффективности плазмотермической очистки от основных примесей важно оценить потери кремния, который неизбежно испаряется вместе с примесями. Значения коэффициентов активности для исследуемых примесей в расплаве кремния взяты из [13]. Температурные зависимости давлений насыщенных паров элементов примесей, содержащихся в расплаве кремния, заимствованы из [17 — 19]. Зависимости коэффициентов испарения основных элементов примесей в металлургическом кремнии от температуры на поверхности расплава представлены на рис. 1.

Из зависимости рис. 1 видно, что такие примеси, как железо и титан, при плазмотермической очистке практически не удаляются, поскольку имеют низкие коэффициенты активности и давления насыщенных паров.

В процессе моделирования исследованы различные варианты локального расположения горячего пятна, формируемого плазменным факелом. Анализ показал, что наиболее подходящими конфигурациями считаются конфигурации горячих пятен, расположенных по кругу вблизи стенок тигля при условии нисходящего движения расплава по осевой линии (при этом происходит восходящее движение расплава у стенок тигля). На рисунке 2 на сегменте расплава дано схематическое расположение одного из горячих пятен, формируемых потоками плазмы в шестиплазмотронной системе.

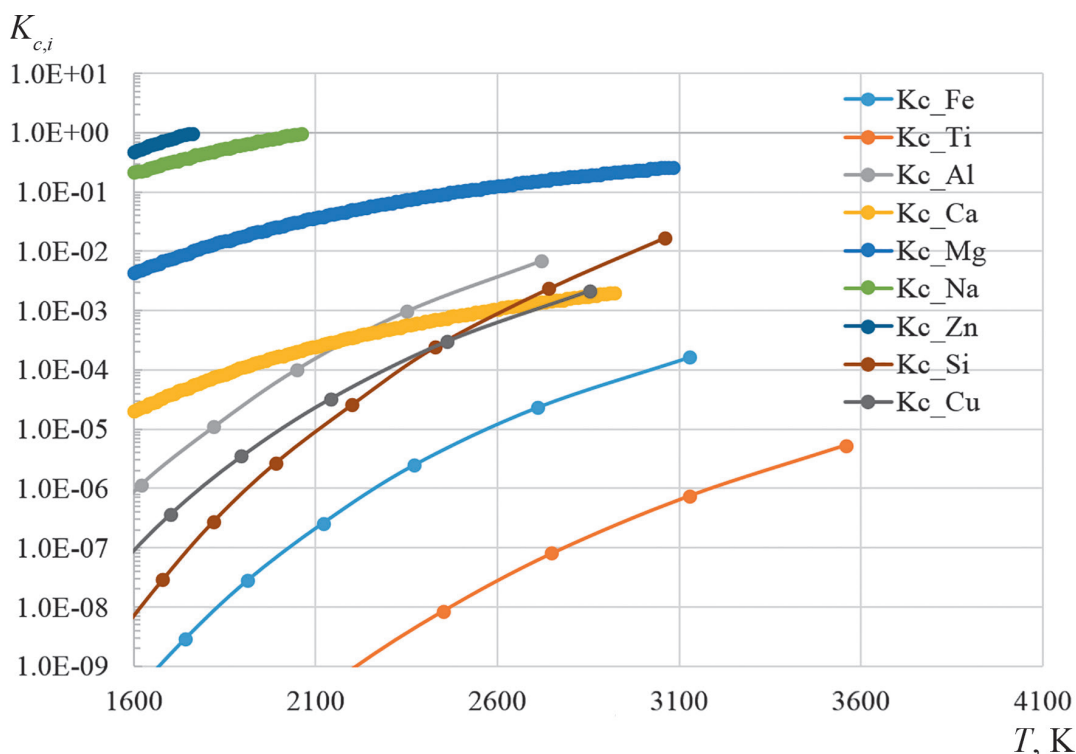


Рис. 1. Зависимости коэффициентов испарения основных элементов примесей в металлургическом кремнии от температуры на поверхности расплава

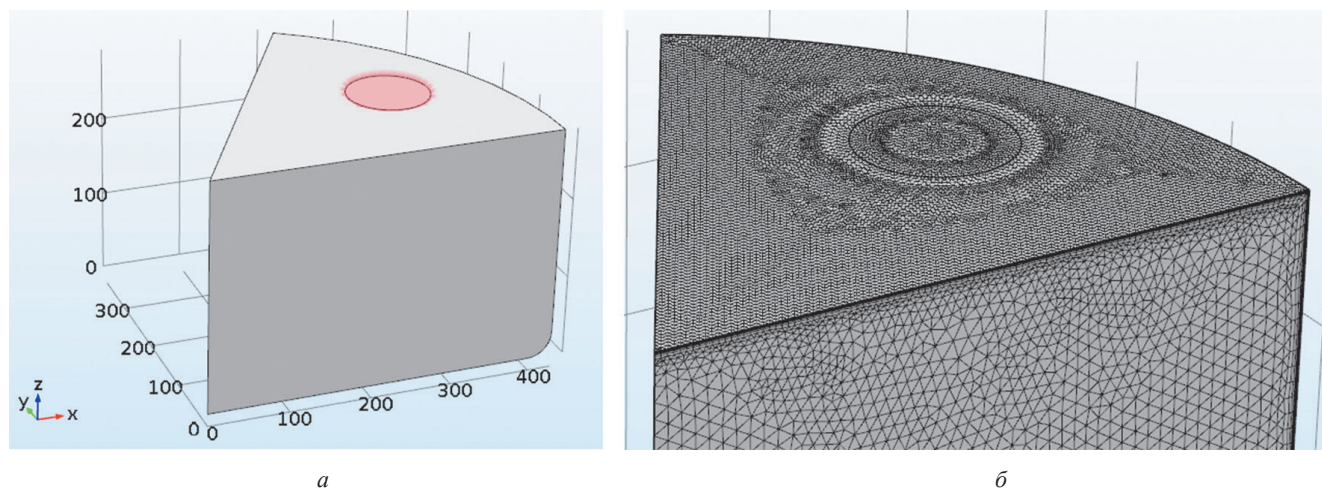


Рис. 2. Базовые геометрии сегмента рассчитываемой области расплава кремния:

a — область источника нагрева, моделирующая плазменную обработку поверхности расплава кремния плазмотроном; *b* — расчетная сетка, используемая при расчете 3D-геометрии модели

Численный расчет процесса очистки выполнен для следующих условий: формат слитка кремния — G5 (825×825×290 мм), масса слитка — 450 кг, температура принята постоянной по всему слитку и равна 1560 °С, использованы следующие начальные значения концентрации для примесей: фосфор Р — 30 ppmw, цинк Zn, натрий Na, алюминий Al, магний Mg, кальций Ca, медь Cu — 1000 ppmw. В расчетах использованы условия МГД-перемешивания при максимальной скорости на поверхности $V_s = 33$ мм/с. Принятые значения параметров: плотность жидкого кремния — 2480 кг/м³, динамическая вязкость — $5,24 \cdot 10^{-4}$ Па·с, электропроводность — $1,23 \cdot 10^6$ См/м. Значения коэффициентов активности для исследуемых примесей в расплаве кремния взяты из [13]. При расчете температурного баланса в качестве граничного условия нижней границы расплава задана температура 1833 К. Начальная температура расплава — 1833 К. Математическое модели-

рование проведено с использованием метода конечных элементов в среде программы COMSOL Multiphysics.

Для моделирования процесса плазмотермической очистки в условиях осесимметричного вертикального МГД-перемешивания расплава использовано поле скоростей, полученное в аксиально-симметричной модели, описанной в [20, 21], и соответствующее геометрии тигля промышленного форм-фактора G5. Использованное распределение скорости в аксиальном сечении изображено на рис. 3.

Результаты моделирования и обсуждение полученных результатов

Для обеспечения заданного температурного диапазона на поверхности расплава кремния в ходе математического моделирования подобран оптимальный режим работы плазмотронов. В качестве исходных параметров оптимизации их работы заданы диаметр

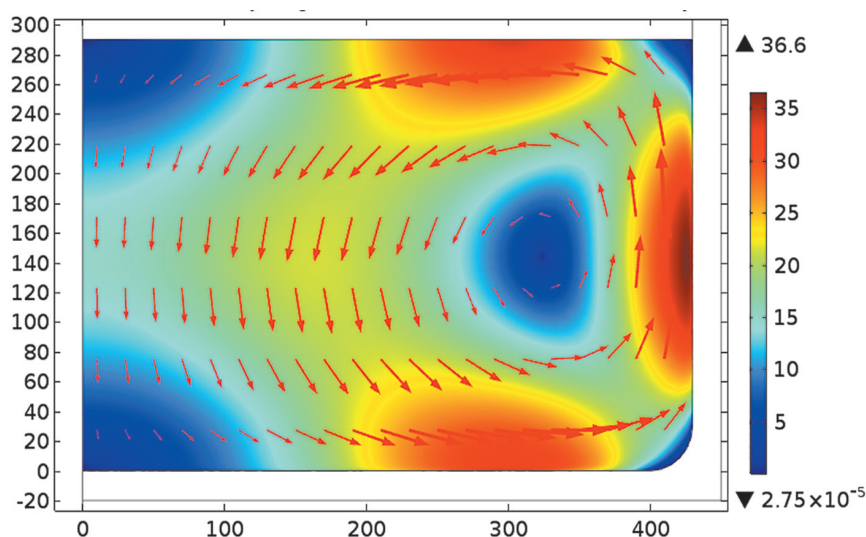


Рис. 3. Аксиально-симметричное распределение поля скоростей движения расплава, использованного в качестве начального условия

области воздействия $D_{пл}$, в которой формируется локальный температурный градиент, и мощность $P_{пл}$, выделяемая на поверхности расплава.

Для определения оптимального размера горячего пятна на поверхности расплава кремния проведены серии численных расчетов теплового режима расплава кремния. Пример картины распределения температуры на поверхности расплава кремния для сегмента шестиплазмотронной системы для различных диаметров областей воздействия и подаваемой мощности дан на рис. 4.

Анализ распределений температуры на поверхности расплава кремния показал, что в условиях МГД-

движения расплава область горячего пятна растягивается от зоны плазмотермического воздействия к центру, тем самым увеличивая площадь активного испарения примесей. Картина объемного распределения температуры свидетельствует о том, что по мере дальнейшего движения расплава температура перераспределяется и снижается до уровня, допустимого для тигля из кварца (менее 1923 K).

Зависимости максимальной температуры на поверхности расплава для шестиплазмотронной системы от диаметра области воздействия при различных мощностях плазмотронов продемонстрированы на рис. 5. Исходя из зависимости коэффициентов испаре-

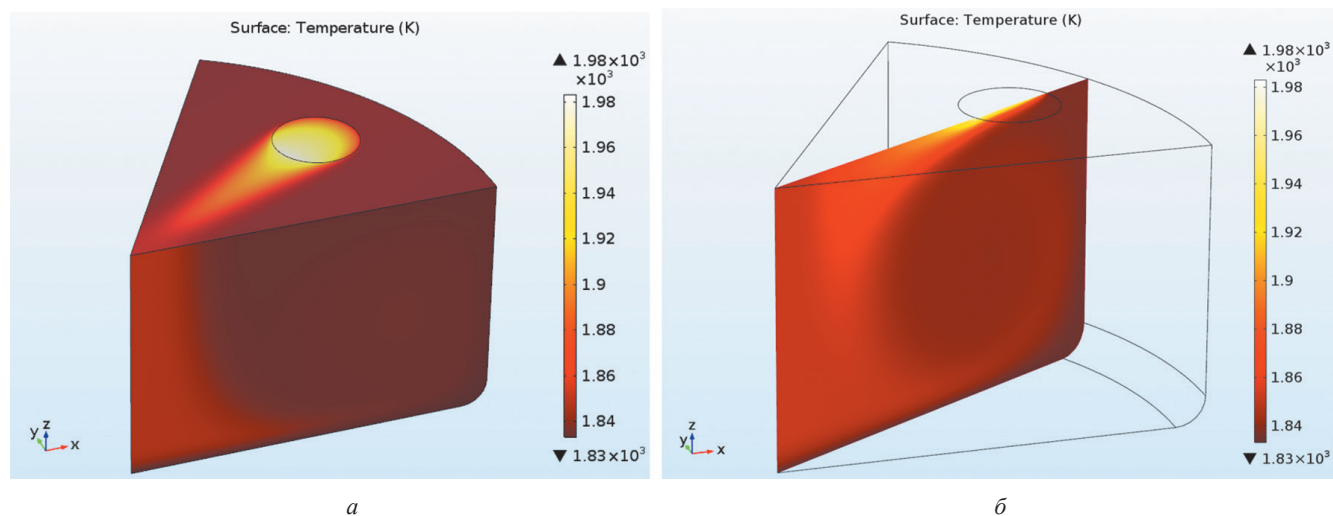


Рис. 4. Распределения температуры на поверхности расплава кремния и в сечении через центр горячего пятна для шестиплазмотронной системы при диаметре пятна $D_{пл} = 120$ мм и подводимой мощности $P_{пл} = 10$ кВт.

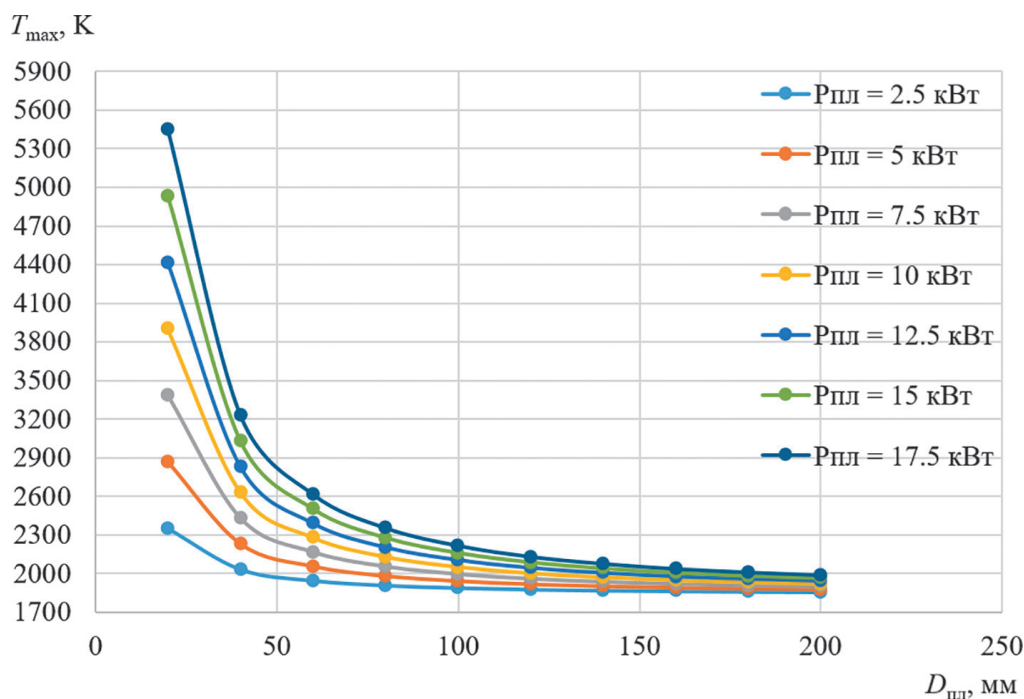


Рис. 5. Зависимости максимальной температуры на поверхности расплава от диаметра области воздействия при различных мощностях плазмотронов

ния основных элементов примесей (см. рис. 1) видно, что превышение температуры (2200...2400 К) в области пятна — нежелательно, поскольку приводит к интенсивному испарению кремния. Таким образом, согласно полученным зависимостям при проектировании систем плазмотермической очистки, необходимо выбирать определенное соотношение между мощностью плазмотрона и диаметром пятна теплового воздействия.

Под действием высокой температуры идет активное испарение примесей из области горячего пятна, а в области теплового следа происходит существенное снижение концентрации примесей. Затем, по мере погружения приповерхностных очищенных слоев в глубь расплава, происходит перераспределение концентрации примеси. Пример распределения концентрации

примесей Al в объеме и на поверхности расплава кремния в момент времени 30 с представлен на рис. 6.

Полученные распределения доказывают, что в процессе плазмотермической очистки эффективное удаление трудноиспаряющихся примесей происходит из областей локального повышения температуры.

На рисунке 7 даны зависимости средних концентраций примесей Al, Ca, Cu, Mg, имеющие средние значения коэффициента испарения, выраженные в процентах, от времени плазмотермической очистки. Концентрация легкоиспаряющихся примесей P, Na, Zn за указанный период очистки снижается более чем на три порядка.

Результаты моделирования показали, что при двадцатичасовой плазмотермической очистке кремния содержание меди падает до 50% от начальной концентра-

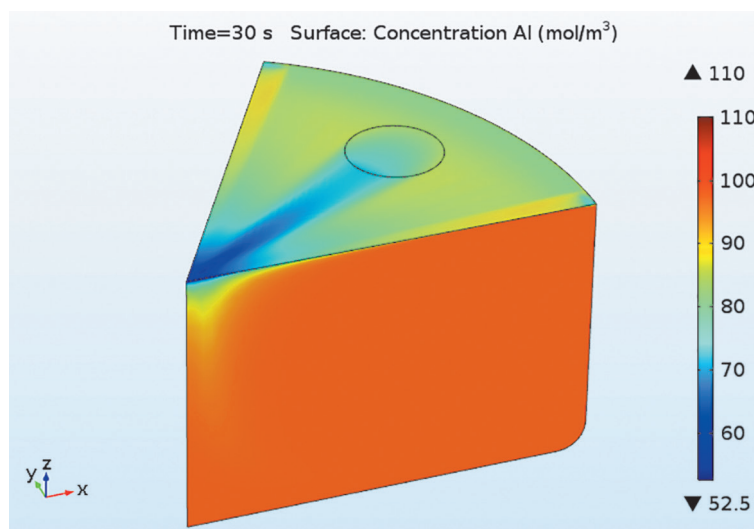


Рис. 6. Распределение концентрации примесей Al в объеме и на поверхности расплава кремния для диаметра пятна $D_{пл} = 120$ мм и подводимой мощности $P_{пл} = 10$ кВт

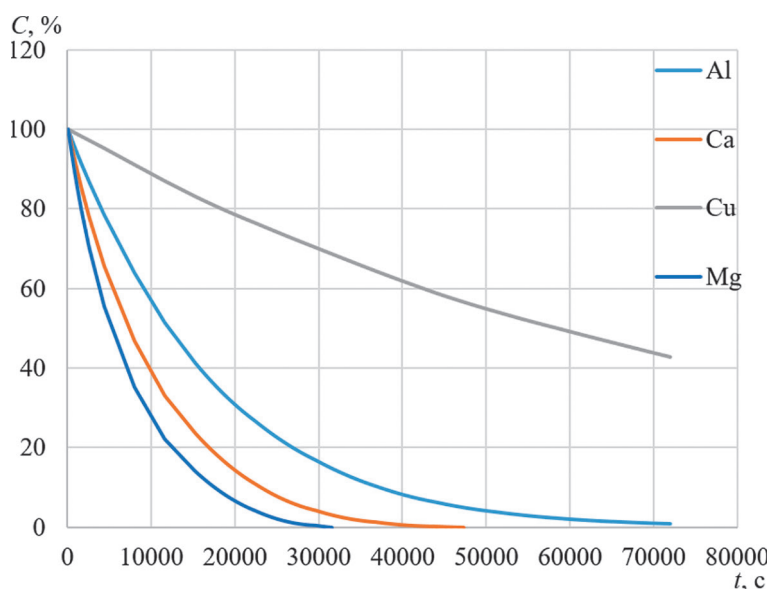


Рис. 7. Временные зависимости уменьшения средних концентраций частиц примесей в расплаве кремния в ходе плазмотермической очистки (диаметр пятна $D_{пл} = 120$ мм, подводимая мощность $P_{пл} = 10$ кВт, число плазмотронов — 6)

ции. Концентрации остальных примесей за все время очистки могут быть снижены до 1% от начального уровня и меньше. Концентрации примесей кальция, магния и алюминия понижаются до 1% от начальной концентрации по истечении половины времени очистки. Таким образом, для эффективного удаления примесей Al, Ca, Cu, Mg на поверхности расплава кремния следует формировать локальные температурные градиенты.

Заключение

В результате проведенного математического моделирования процесса плазмотермической очистки кремния в условиях больших объемов кремния, соответствующих формату слитка G5, установлено, что:

- в условиях МГД-движения расплава кремния с направлением перемешивания, соответствующем нис-

ходящему потоку по центральной оси, область горячего пятна растягивается от зоны плазмотермического воздействия к центру, тем самым увеличивая площадь активного испарения примесей;

- в процессе плазмотермической очистки в условиях МГД-перемешивания возможно создание локальных областей горячих пятен при сохранении уровня безопасной температуры стенок кварцевого тигля;

- плазмотермическая очистка обеспечивает эффективное удаление трудноиспаряющихся примесей Al, Ca, Cu, Mg. Их испарение идет преимущественно из областей горячих пятен, температура которых на 100...300 К превышает среднюю температуру расплава.

Результаты выполненных исследований использованы при разработке технологии очистки кремния и проектировании установки для реализации данного процесса.

Литература

1. Ceccaroli B., Ovrelid E., Pizzini S. Solar Silicon Processes: Technologies, Challenges, and Opportunities. Boca Raton: CRC Press, 2016.
2. Braga A.F.B. e. a. New Processes for the Production of Solar-grade Polycrystalline Silicon: a review // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2008. V. 92. Pp. 418—424.
3. Delannoy Y. Purification of Silicon for Photovoltaic Applications // J. Crystal Growth. 2012. V. 360. Pp. 61—67.
4. Woosoon L., Wooyoung Y., Choonghwan P. Purification of Metallurgical-grade Silicon in Fractional Melting Process // J. Crystal Growth. 2009. V. 312. Pp. 146—148.
5. Pengting Li e. a. Effect of Alternating Magnetic Field on the Removal of Metal Impurities in Silicon Ingot by Directional Solidification // J. Crystal Growth. 2016. V. 437. Pp. 14—19.
6. Kudla Ch. e. a. Crystallization of 640 kg Mc-silicon Ingots under Traveling Magnetic Field by Using a Heater-magnet Module // J. Crystal Growth. 2013. V. 365. Pp. 54—58.
7. Nakamura N. e. a. Boron Removal in Molten Silicon with Steam Added Plasma Melting Method // J. Japan Institute of Metals. 2003. V. 67. Pp. 583—589
8. Altenberend J., Chichignoud G., Delannoy Y. Study of Mass Transfer in Gas Blowing Processes for Silicon Purification // Metallurgical and Materials Trans. E. 2017. V. 4(1). Pp. 41—51.
9. Alemany C. e. a. Refining of Metallurgical-grade Silicon by Inductive Plasma // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2002. V. 72. Pp. 41—48.
10. Karabanov S.M. e. a. Study of Interaction of a Plasma Jet with the Silicon Melt Surface under the Conditions of Its High Turbulence // Proc. Environment and Electrical Eng. and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe Intern. Conf. 2017. Pp. 1—5.
11. Karabanov S.M. e. a. Mathematical Modeling and Experimental Research of the Method of Plasma Chemical Purification of Metallurgical-grade Silicon // Proc. XVI

References

1. Ceccaroli B., Ovrelid E., Pizzini S. Solar Silicon Processes: Technologies, Challenges, and Opportunities. Boca Raton: CRC Press, 2016.
2. Braga A.F.B. e. a. New Processes for the Production of Solar-grade Polycrystalline Silicon: a review. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2008;92:418—424.
3. Delannoy Y. Purification of Silicon for Photovoltaic Applications. J. Crystal Growth. 2012;360:61—67.
4. Woosoon L., Wooyoung Y., Choonghwan P. Purification of Metallurgical-grade Silicon in Fractional Melting Process. J. Crystal Growth. 2009;312:146—148.
5. Pengting Li e. a. Effect of Alternating Magnetic Field on the Removal of Metal Impurities in Silicon Ingot by Directional Solidification. J. Crystal Growth. 2016;437:14—19.
6. Kudla Ch. e. a. Crystallization of 640 kg Mc-silicon Ingots under Traveling Magnetic Field by Using a Heater-magnet Module. J. Crystal Growth. 2013;365:54—58.
7. Nakamura N. e. a. Boron Removal in Molten Silicon with Steam Added Plasma Melting Method. J. Japan Institute of Metals. 2003;67:583—589
8. Altenberend J., Chichignoud G., Delannoy Y. Study of Mass Transfer in Gas Blowing Processes for Silicon Purification. Metallurgical and Materials Trans. E. 2017;4(1):41—51.
9. Alemany C. e. a. Refining of Metallurgical-grade Silicon by Inductive Plasma. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2002;72:41—48.
10. Karabanov S.M. e. a. Study of Interaction of a Plasma Jet with the Silicon Melt Surface under the Conditions of Its High Turbulence. Proc. Environment and Electrical Eng. and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe Intern. Conf. 2017:1—5.
11. Karabanov S.M. e. a. Mathematical Modeling and Experimental Research of the Method of Plasma Chemical Purification of Metallurgical-grade Silicon. Proc. XVI

Intern. Conf. Environment and Electrical Eng. Florence, 2016. Pp. 1—5.

12. **Zheng S.S. e. a.** Mass Transfer of Phosphorus in Silicon Melts Under Vacuum Induction Refining // Metallurgical and Materials Trans. B. 2010. V. 41. P. 1268.

13. **Safarian J., Tangstad M.** Vacuum Refining of Molten Silicon // Metallurgical and Materials Trans. B. 2012. V. 43(6). Pp. 1427—1445.

14. **Dong W. e. a.** Removal of Phosphorus in Metallurgical Grade Silicon Using Electron Beam Melting // Materials Sci. Forum. 2011. V. 675—677. Pp. 45—48.

15. **Karabanov S.M. e. a.** Study of Impurities Diffusion in Silicon Liquid Phase in Conditions of High Turbulence of Melt // Proceedings 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition. Amsterdam, 2017. Pp. 501—504.

16. **Yasevich V.I. e. a.** Mathematical Modeling of Metallurgical-grade Silicon Plasma-chemical Purification Process // Proc. of 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition. Munich, 2016. Pp. 1001—1004.

17. **Эспе В.** Технология электровакуумных материалов. Т. 2. Силикатные материалы. М.-Л.: Энергия, 1968.

18. **Lide D.R.** CRC Handbook of Chemistry and Physics: a Ready-reference Book of Chemical and Physical Data. Boca Raton: CRC Press, 2003.

19. **ГСССД 112—87.** Литий, натрий, калий, рубидий, цезий. Давление насыщенных паров при высоких температурах.

20. **Karabanov S.M. e. a.** Study of the Temperature Influence on the Efficiency of Silicon Vacuum Refining under Electromagnetic Stirring // Proc. IEEE Intern. Conf. Environment and Electrical Eng. Genova, 2019. Pp. 1—5.

21. **Karabanov S.M. e. a.** Mathematical Modeling of Vacuum Refining of Silicon Melt under the Conditions of Electromagnetic Stirring // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1999. Pp. 1—8.

Intern. Conf. Environment and Electrical Eng. Florence, 2016:1—5.

12. **Zheng S.S. e. a.** Mass Transfer of Phosphorus in Silicon Melts Under Vacuum Induction Refining. Metallurgical and Materials Trans. B. 2010;41:1268.

13. **Safarian J., Tangstad M.** Vacuum Refining of Molten Silicon. Metallurgical and Materials Trans. B. 2012;43(6):1427—1445.

14. **Dong W. e. a.** Removal of Phosphorus in Metallurgical Grade Silicon Using Electron Beam Melting. Materials Sci. Forum. 2011;675—677:45—48.

15. **Karabanov S.M. e. a.** Study of Impurities Diffusion in Silicon Liquid Phase in Conditions of High Turbulence of Melt. Proceedings 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition. Amsterdam, 2017:501—504.

16. **Yasevich V.I. e. a.** Mathematical Modeling of Metallurgical-grade Silicon Plasma-chemical Purification Process. Proc. of 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition. Munich, 2016:1001—1004.

17. **Espe V.** Tekhnologiya Elektrovakuumnykh Materialov. T. 2. Silikatnye Materialy. M.-L.: Energiya, 1968. (in Russian).

18. **Lide D.R.** CRC Handbook of Chemistry and Physics: a Ready-reference Book of Chemical and Physical Data. Boca Raton: CRC Press, 2003.

19. **GSSSD 112—87.** Litiy, Natriy, Kaliy, Rubidiy, Tseziy. Davlenie Nasyshchennykh Parov pri Vysokikh Temperaturakh. (in Russian).

20. **Karabanov S.M. e. a.** Study of the Temperature Influence on the Efficiency of Silicon Vacuum Refining under Electromagnetic Stirring. Proc. IEEE Intern. Conf. Environment and Electrical Eng. Genova, 2019:1—5.

21. **Karabanov S.M. e. a.** Mathematical Modeling of Vacuum Refining of Silicon Melt under the Conditions of Electromagnetic Stirring. AIP Conf. Proc. 2018. V. 1999:1—8.

Сведения об авторах:

Карabanov Сергей Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: smkarabanov@gmail.com

Суворов Дмитрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: dmitriy_suvorov@mail.ru

Тарабрин Дмитрий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: tarabrin-dmitriy@mail.ru

Сливкин Евгений Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: e.slivkin@mail.ru

Карabanov Андрей Сергеевич — ведущий инженер Центра перспективных технологий и материалов Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: and.karabanov@gmail.com

Гололобов Геннадий Петрович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: gololobov.gennady@yandex.ru

Information about authors:

Karabanov Sergey M. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electronic Devices Dept., Ryazan State Radio Engineering University, e-mail: smkarabanov@gmail.com

Suvorov Dmitriy V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., Ryazan State Radio Engineering University, e-mail: dmitriy_suvorov@mail.ru

Tarabrin Dmitriy Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., Ryazan State Radio Engineering University, e-mail: tarabrin-dmitriy@mail.ru

Slivkin Evgeniy V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., Ryazan State Radio Engineering University, e-mail: e.slivkin@mail.ru

Karabanov Andrey S. — Leading Engineer of the Center for Advanced Technologies and Materials, Ryazan State Radio Engineering University, e-mail: and.karabanov@gmail.com

Gololobov Gennadiy P. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Industrial Electronics Dept., Ryazan State Radio Engineering University, e-mail: gololobov.gennady@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 15.02.2022

The article received to the editor: 15.02.2022

Статья принята к публикации: 24.10.2022

The article has been accepted for publication: 24.10.2022