



УДК 669.187.58

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯ ИНДУКТОРА НА КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ

С. Г. Егоров, И. Ф. Червоный, Р. Н. Воляр

Исследован процесс выращивания монокристаллов кремния способом индукционной бестигельной зонной плавки с применением подогревающего индуктора. При помощи математического моделирования установлены параметры электромагнитного поля подогревающего индуктора и определены условия, при которых электромагнитное поле подогревающего индуктора оказывает влияние на условия выращивания монокристаллов.

Process of growing single crystals of silicon by the method of induction crucible-free zonal melting with use of preheating inductor was investigated. Using the mathematical modeling, the parameters of electromagnetic field of preheating inductor were established and conditions, at which the electromagnetic field of preheating inductor has an influence on the conditions of single crystal growing, were defined.

**Ключевые слова:** бестигельная зонная плавка, подогревающий индуктор, электромагнитное поле, эффективный коэффициент распределения примеси

**Введение.** Для улучшения условий охлаждения выращиваемого монокристалла кремния способом бестигельной зонной плавки применяют подогревающий индуктор [1, 2]. Значение тока, подаваемого на подогревающий индуктор, меньше поступающего на плавильный индуктор в 5...17 раз. Как правило, частота тока подогревающего индуктора совпадает с таковой тока плавильного индуктора и при выращивании монокристаллов кремния большого диаметра ( $\geq 75$  мм) способом бестигельной зонной

плавки составляет 2,8 МГц. Однако для обеспечения оптимальных тепловых условий выращивания монокристалла частоту тока подогревающего индуктора необходимо снижать [3], поскольку проникающая способность электромагнитного поля при этом возрастает.

**Цель.** Исследовали электромагнитное поле подогревающего индуктора при выращивании монокристаллов кремния способом индукционной бестигельной зонной плавки и его влияние на диффузионный слой вблизи фронта кристаллизации, а также эффективный коэффициент распределения примеси.

**Основная часть.** Подогревающий индуктор обеспечивает подогрев монокристаллов кремния, являющегося диэлектрическим материалом. Глубину проникновения тока в диэлектрический материал  $\Delta$  можно определить по следующему уравнению [4]:

$$\Delta = \frac{1}{2\pi f \sqrt{\frac{\mu}{2}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{ТВ}}}{2\pi f}\right)^2 + \varepsilon^2 - \varepsilon}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{ТВ}}$  — электропроводность твердого кремния,  $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ ;  $\mu$  — магнитная проницаемость вещества,  $\mu \approx 12,56 \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $f$  — частота электромагнитного поля, Гц;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость вещества,  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0 = 1,06 \cdot 10^{-10}$  Ф/м;  $\varepsilon_{\text{Si}}$  — относительная диэлектрическая проницаемость кремния,  $\varepsilon_{\text{Si}} = 12$ ;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

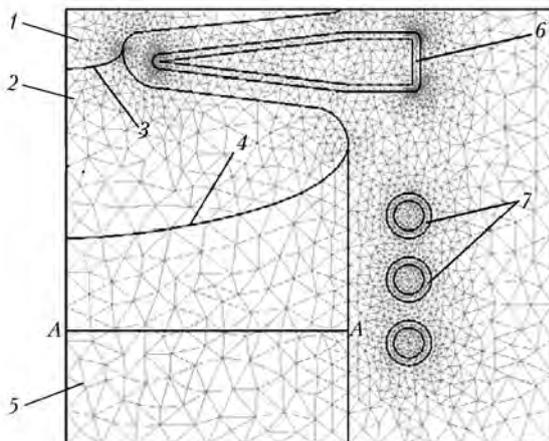


Рис. 1. Геометрическая схема математической модели с нанесенной сеткой конечных элементов: 1 — исходный поликристаллический стержень; 2 — зона расплава; 3 — фронт плавления; 4 — фронт кристаллизации; 5 — монокристалл; 6 — вилки подогревающего индуктора; 7 — плавильный индуктор

© С. Г. ЕГОРОВ, И. Ф. ЧЕРВОНЫЙ, Р. Н. ВОЛЯР, 2009



Для уменьшения радиального градиента температуры необходимо обеспечить прогрев большей части выращиваемого монокристалла за счет увеличения проникновения электромагнитного поля. Выполнить эту задачу можно путем снижения частоты тока подогревающего индуктора.

Однако для создания оптимальных тепловых условий выращивания монокристалла требуется максимум объемной удельной мощности, зафиксированный при отношении диаметра монокристалла к глубине проникновения тока  $d_{кр}/\delta = 3,5$  [4]. Поэтому для диаметра монокристалла  $d_{кр} = 150$  мм значение  $\delta$  составляет 42,86 мм. Для обеспечения заданной глубины проникновения  $\delta$  частота электромагнитного поля согласно формуле (1) должна составлять  $f_p \approx 2,35$  кГц ( $f_p$  – расчетная частота тока).

Для расчета температурного градиента в выращиваемом монокристалле и его зависимости от частоты тока подогревающего индуктора необходимо рассчитать электромагнитное поле, генерируемое подогревающим индуктором при разных частотах.

С целью изучения электромагнитного поля подогревающего индуктора построили математическую модель, в основе которой лежат уравнения Максвелла:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = 0, \\ \vec{j} = \sigma \vec{E}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $j$  – плотность электрического тока, А/м<sup>2</sup>.

Решение системы (2) осуществляли путем введения электрического  $\phi$  и векторного магнитного  $A$  потенциалов:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\nabla \phi - \partial A / \partial t, \\ \vec{B} &= \vec{\nabla} \times \vec{A}. \end{aligned}$$

Расчет мощности, выделяемой в единице объема выращиваемого монокристалла при воздействии

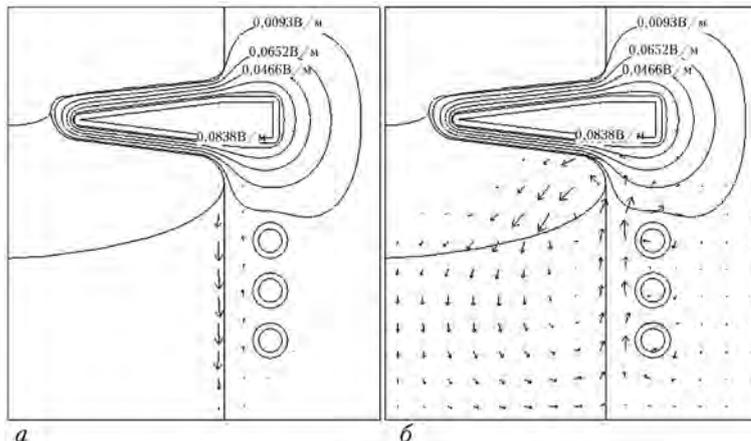


Рис. 2. Электромагнитное поле подогревающего индуктора при различных частотах. Здесь и на рис. 3, 5: а –  $f_{под} = f_{пл} = 2,8$  МГц; б –  $f_{под} = f_p = 2,35$  кГц; контурные линии соответствуют напряженности электрического поля (В/м) плавильного индуктора, а длина стрелок пропорциональна магнитному полю (А/м) подогревающего индуктора)

Физические свойства материалов				
Параметр	Твердый кремний	Расплав кремния	Медь	Аргон
Электропроводность, (Ом·м) <sup>-1</sup>	$5,0 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^6$	$5,99 \cdot 10^7$	–
Относительная диэлектрическая проницаемость	12,1	1,0	1,0	1,0
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2330	2530	8950	1,784
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	22	67	400	0,0164
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	703	1000	385	523

электромагнитного поля подогревающего индуктора, осуществляли по следующей формуле [5]:

$$Q = 2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\operatorname{tg} \alpha$  – тангенс угла поглощения. Принимаем  $\operatorname{tg} \alpha = 1$ .

Для решения поставленной задачи применяли математический пакет «Femlab», реализующий метод конечных элементов. Схема математической модели представлена на рис. 1.

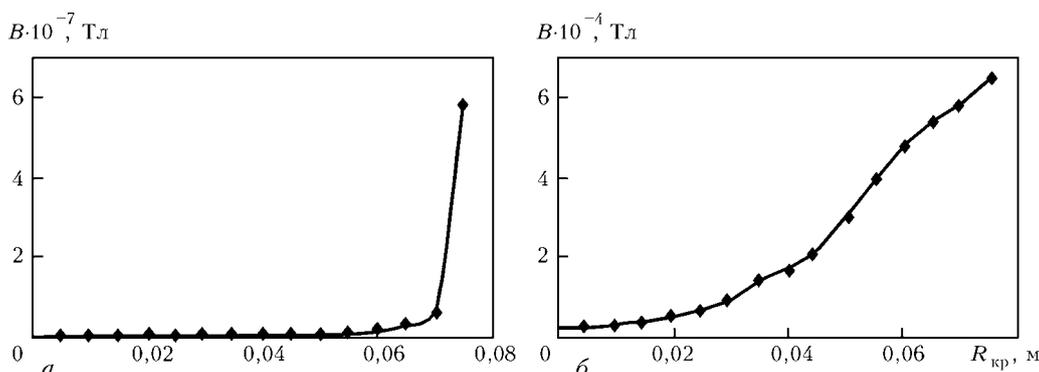


Рис. 3. Распределение индукции  $B$  магнитного поля подогревающего индуктора вблизи фронта кристаллизации;  $R_{кр}$  – радиус монокристалла

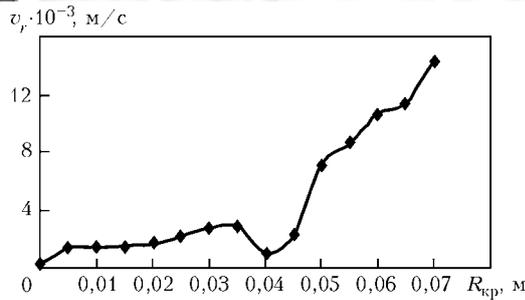


Рис. 4. Скорость движения расплава вблизи фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов кремния диаметром 76 мм способом индукционной бестигельной зонной плавки

В рассматриваемой области находятся плавильный индуктор и элементы подогревающего индуктора (рабочая среда — аргон), выращиваемый монокристалл и зона расплава. Ток плавильного индуктора и его частота в расчетах имели следующие значения:  $I_{пл} = 1700$  А и  $f_{пл} = 2,8$  МГц. Отношение тока плавильного индуктора к току подогревающего индуктора принимали равной  $f_{под} = f_p$ . Физические свойства рассматриваемых материалов приведены в таблице [6, 7].

Расчитано электромагнитное поле подогревающего индуктора (рис. 2), а также распределение его магнитной индукции вблизи фронта кристаллизации для различных значений рабочей частоты тока (рис. 3).

Согласно работе [8], влияние электромагнитного поля на толщину диффузионного слоя можно оценить по следующему выражению:

$$\frac{\delta_B}{\delta} = \frac{Ha}{\sqrt{Re}}, \quad (3)$$

где  $\delta_B$  — толщина диффузионного слоя при наличии электромагнитного поля, м;  $\delta$  — толщина диффузионного слоя без электромагнитного поля, м;  $Ha$  — критерий Гартмана

$$Ha = BR_{кр} \sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho v}}, \quad (4)$$

где  $R_{кр}$  — радиус монокристалла, м;  $\sigma_p$  — электропроводность расплава, для расплава кремния  $\sigma_p = 1,23 \cdot 10^6$  Ом·м [6];  $\rho$  — плотность расплава, для расплава кремния  $\rho = 2530$  кг/м<sup>3</sup> [6];  $v$  — кинема-

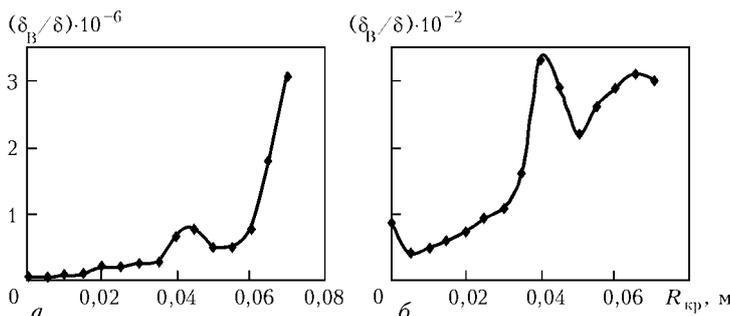


Рис. 5. Изменение толщины диффузионного слоя на фронте кристаллизации при воздействии электромагнитного поля

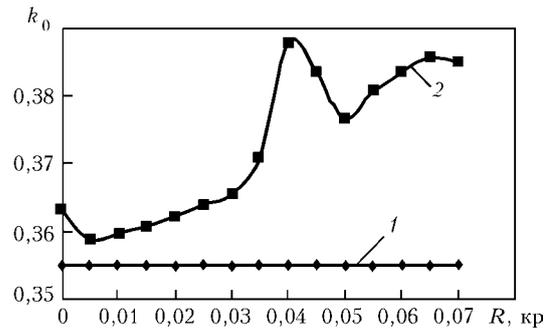


Рис. 6. Расчетное значение эффективного коэффициента распределения примеси на фронте кристаллизации: 1 —  $f = 2,8$  МГц; 2 —  $f = 2,35$  кГц

тическая вязкость расплава, для расплава кремния  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с [6];  $Re$  — критерий Рейнольдса.

$$Re = \frac{vR_{кр}}{v_p}, \quad (5)$$

где  $v_p$  — скорость потоков расплава, м/с.

Распределение скорости движения потоков расплава вблизи фронта кристаллизации показано на рис. 4 [9]. Резкое падение скорости движения расплава в средней части объясняется наличием в зоне расплава двух конвекционных ячеек, вращающихся в противоположные стороны. Именно в области их встречи скорость движения расплава уменьшается.

Результаты расчетов, выполненных по формулам (3)–(5), представлены на рис. 5. При снижении рабочей частоты тока подогревающего индуктора увеличиваются степень проникновения электромагнитного поля в зону расплава и его воздействие на диффузионный слой. Это способствует увеличению толщины диффузионного слоя (рис. 5, а).

Влияние изменения толщины диффузионного слоя на эффективный коэффициент распределения примеси  $k_{эф}$  на фронте кристаллизации определяли по следующей формуле [10]:

$$k_{эф} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-f \delta_B / D)},$$

где  $k_0$  — равновесный коэффициент распределения примеси,  $k_0 = 0,35$ ;  $v_{кр}$  — скорость выращивания монокристалла,  $f = 5 \cdot 10^{-5}$  м/с (3 мм/мин);  $D$  — коэффициент диффузии,  $D = 1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с.

Изменение толщины диффузионного слоя на фронте кристаллизации под воздействием электромагнитного поля влияет на значение эффективного коэффициента распределения примеси (рис. 6). В случае равенства рабочей частоты тока подогревающего и плавильного индукторов электромагнитное поле не оказывает влияния на эффективный коэффициент распределения примеси (рис. 6, кривая 1). При снижении рабочей частоты тока до уровня  $f_p$  обнаружено неравномерное распределение эффективного коэффициента распределения примеси вдоль радиуса монокристалла (рис. 6, кривая 2). Это дает возможность управлять степенью очистки монокристаллов



кремния от примесей при выращивании их способом индукционной бестигельной зонной плавки.

### Выводы

1. Проведенные исследования показали, что снижение частоты тока подогревающего индуктора дает возможность контролировать толщину диффузионного слоя на фронте кристаллизации.

2. Появляется возможность управлять эффективным коэффициентом распределения примеси и, следовательно, степенью очистки монокристаллов от примесей в процессе их выращивания.

1. Бронникова Л. П., Добровольская В. И., Ратников Д. Г. Определение температурных градиентов в слитках кремния при бестигельной зонной плавке // Промышленное применение токов высокой частоты: Тр. ВНИИ ТВЧ. — 1974. — Вып. 14. — С. 65–74.
2. Добровольская В. И., Ратников Д. Г. Исследование индукционных систем вертикальной бестигельной зонной плавки // Там же. — 1974. — Вып. 14. — С. 78–85.
3. Егоров С. Г., Червоный И. Ф., Колобов Г. А. Анализ влияния магнитного поля подогревающего индуктора на расплавленную зону при БЗП // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб.

- докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. (Харьков, 19–23 мая 2003 г.) — Харьков, 2003. — С. 320–323.
4. Глуханов Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1979. — 64 с.
  5. *Высокочастотная электротермия*: Справочник / Под ред. А. В. Донского. — М.: Машиностроение, 1965. — 564 с.
  6. Numerical study of transient behavior of molten zone during industrial FZ process for large silicon crystal growth // J. Cryst. Growth. — 2004. — V. 266. — P. 54–59.
  7. Interface shape, heat transfer and fluid flow in the floating zone growth of large silicon crystals with the needle-eye technique // Ibid. — 1995. — V. 151. — P. 66–79.
  8. *Выращивание полупроводниковых монокристаллов с электромагнитным воздействием на расплав* / Ю. М. Гельфгат, В. С. Земсков, М. Р. Раухман, М. З. Соркин // Процессы роста полупроводниковых кристаллов и пленок. — Новосибирск: Наука, 1988. — 300 с.
  9. Muehlbauer A., Muznieks A., Raming G. System of mathematical models for the analysis of industrial FZ-Si-crystal growth processes // Cryst. Res. Technol. — 1999. — V. 34. — P. 217–226.
  10. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 143 с.

Гос. инж. акад., Запорожье

Поступила в редакцию 07.10.2008

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ



Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

### ДОКТОРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные технологии
- ☞ автоматизация технологических процессов
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

### АСПИРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные технологии
- ☞ автоматизация технологических процессов
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

*Прием документов проводится в сентябре.*

*Контактный телефон: 289-84-11.*

*Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www.paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)*

*Документы направлять по адресу:*

*03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,*

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю*