

С.Г.Егоров, И.Ф.Червоный, Р.Н.Воляр

**УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ НА КАЧЕСТВО
МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ***Запорожская государственная инженерная академия*

Вивчено принципову можливість зниження впливу теплової конвекції під час вирощування монокристалів кремнію методом Чохральського. Зменшення висоти розплаву в тиглі призводить до якісного та кількісного змінювання швидкості руху потоків. За таких умов забезпечується стаціонарний режим розвитку теплової конвекції.

Изучена принципиальная возможность снижения влияния тепловой конвекции при выращивании монокристаллов кремния методом Чохральского. Уменьшение высоты расплава в тигле приводит к качественному и количественному изменению скорости движения потоков. В таких условиях обеспечивается стационарный режим развития тепловой конвекции.

Введение. В настоящее время основным полупроводниковым материалом остается монокристаллический кремний, большую часть которого (до 90%) производят методом Чохральского [1]. Интенсивное развитие производства монокристаллов полупроводниковых материалов осуществляется при одновременном ужесточении требований к их качеству. Повышение производительности процесса осуществляют в направлении увеличения диаметра монокристаллов при относительно постоянной их длине.

При увеличении диаметра выращиваемого монокристалла приходится увеличивать и диаметр тигля, что сопровождается значительным увеличением объема расплава, а также мощности нагревателей для создания необходимого перепада температуры. При этом выращивание монокристаллов с заданными электрофизическими параметрами из расплавов большого объема усложняется из-за возрастания влияния тепловой конвекции, развивающейся в расплаве. Движение расплава, вызванное тепловой конвекцией, способствует его перемешиванию, но при этом возникают существенные колебания температуры и концентрации примеси на фронте кристаллизации. Такие колебания приводят к появлению примесных полос в выращиваемых монокристаллах и снижают их качественные показатели [2,3]. Для уменьшения или устранения влияния тепловой конвекции изменяют геометрические параметры расплава, уменьшают градиент температуры, применяют поперечные и осевые магнитные поля [4].

Целью работы является изучение возможности уменьшения высоты расплава в тигле при выращивании монокристаллов кремния большого диаметра (300 мм) методом Чохральского для обеспечения стационарного режима развития тепловой конвекции.

Основная часть исследований. Согласно работе [4], для обеспечения стационарного режима развития конвекции необходимо, чтобы величина критерия Рэлея была меньше критической величины ($Ra_{кр}$) при заданном отношении высоты расплава к диаметру тигля (H/D):

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \chi} < Ra_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; β - коэффициент объемного расширения расплава кремния, $\beta = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$; ΔT - перепад температуры между нагретой и холодной

областями расплава, К; L - характерный размер рассматриваемой области, м; ν - кинематическая вязкость расплава кремния, $\nu = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; χ - коэффициент температуропроводности расплавленного кремния, $\chi = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Примесные полосы в монокристалле наблюдаются в тех случаях, когда зависимость $Ra = f(H/D)$ выше кривой $Ra_{кр}$, и не наблюдаются при выполнении условия (1) (рис.1). Исходя из этих предположений, для выращивания кристаллов большого диаметра при малой эффективной глубине расплава предложено применение экранов, двойных тиглей и непрерывной подпитки во время выращивания [4]. Однако эти методы не находят широкого применения в промышленном масштабе.

Учитывая, что число Рэлея для установок Чохральского не должно превышать 10^4 при отношении $0,5 < H/D < 2$, можно рассчитать высоту расплава в тигле, при которой тепловая конвекция будет находиться в стационарном режиме или будет отсутствовать.

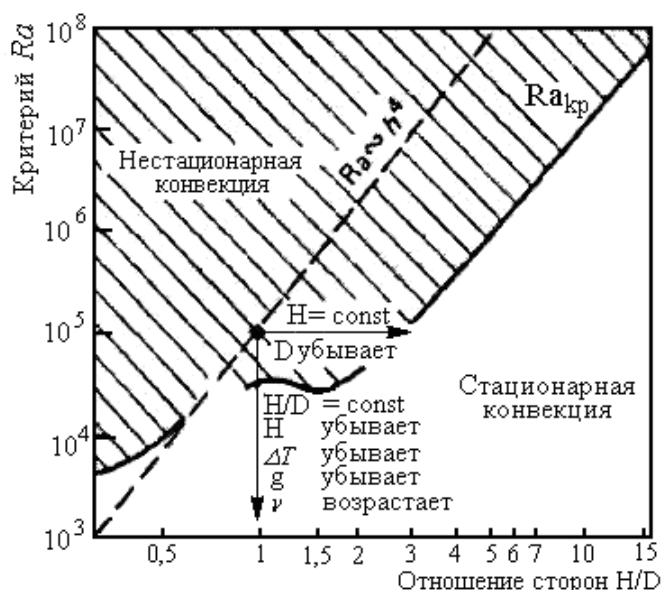


Рисунок 1 – Диаграмма устойчивости течения расплава

Выбираем в качестве характерного размера высоту расплава в тигле h и выражаем ΔT через минимальный температурный градиент 5 К/см (500 К/м): $\Delta T = 500 \cdot h$.

Далее, подставляя в уравнение (1) $Ra = 10^4$ и значения всех остальных параметров, определяем величину h : $h = 0,0186 \text{ м}$. Таким образом, высота расплава составила порядка 20 мм, при этом минимальная разность температур $\Delta T = 500 \cdot 0,02 = 10 \text{ К}$.

Дальнейшим шагом исследований был расчет скорости движения расплава в тигле для обоих режимов. С этой целью была построена двумерная математическая модель движения расплава в тигле, которая базируется на совместном решении системы уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска с уравнениями переноса теплоты (решение осуществляли с помощью математического пакета *Femlab*):

$$\left. \begin{aligned} -\eta \cdot \nabla^2 U + \rho \cdot (U \nabla) \cdot U + \nabla P &= F \\ \nabla U &= 0 \\ \nabla(-k \cdot \nabla T + \rho \cdot C_\delta \cdot T \cdot U) &= Q_T \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где η - динамическая вязкость расплава кремния, $\eta = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$; U - вектор скорости; ρ - плотность расплава кремния, $\rho = 2530 \text{ кг/м}^3$; P - вектор давления; F - вектор внешних

сил; T - температура, К; k - коэффициент теплопроводности, $k = 67$ Вт/(м·К); C_p - теплоемкость расплава кремния, $C_p = 1000$ Дж/(кг·К); Q_T - источник теплоты.

Решение системы уравнений (2) осуществляли при следующих граничных условиях:

– ось симметрии:

$$u = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

– стенки тигля:

$$u = v = 0; \quad T = T_{\text{стенки}}; \quad (4)$$

– свободная поверхность расплава:

$$u = f(x); \quad v = f(x); \quad T = f(x); \quad (5)$$

– фронт кристаллизации:

$$u = v = 0; \quad T = T_{\text{крист}}; \quad (4)$$

где u, v - радиальная и осевая составляющие вектора скорости движения расплава; $T_{\text{нагр}}$ - температура стенок тигля, К; $T_{\text{крист}}$ - температура кристаллизации расплава, К.

Расчеты выполняли для двух режимов:

– радиус тигля $R_{\text{тигля}} = 0,3$ м, радиус кристалла $R_{\text{крист}} = 0,15$ м, высота расплава $H = 0,2$ м, отношение $H/D = 0,3$;

– $R_{\text{тигля}} = 0,3$ м, $R_{\text{кристалла}} = 0,15$ м, высота расплава $H = 0,02$ м, отношение $H/D = 0,03$. Вращение монокристалла и тигля не учитывали.

Полученные результаты расчетов подтвердили предположение о том, что с уменьшением высоты расплава скорость его движения снижается. Также уменьшается область, занимаемая потоками расплава (рис.2,3). Видно, что во втором режиме вблизи границы «монокристалл–свободная поверхность» формируются два вихря – один непосредственно под другим. Поэтому течение расплава практически не попадает под растущий монокристалл (рис.3) и не будет оказывать влияние на условия кристаллизации.

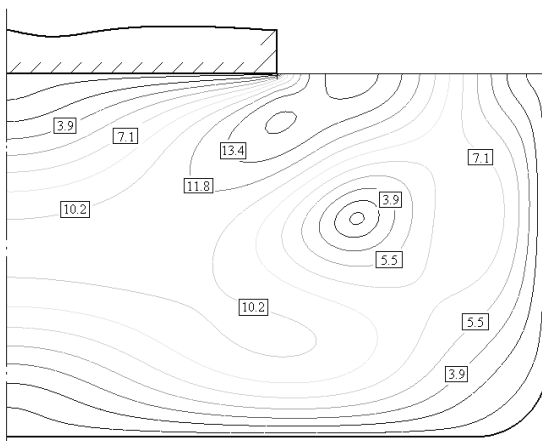


Рисунок 2 – Скорость движения расплава (м/с) в тигле при высоте расплава $H = 0,2$ м

Уменьшение эффективной глубины расплава способствует качественному изменению величины скорости движения расплава (рис.4). При отношении $H/D = 0,3$ потоки расплава распространяются по всему объему расплава и равны нулю только вблизи стенки тигля (рис.4,а). В то время как при отношении $H/D = 0,03$ скорость потоков расплава близка к нулю в подкристальной области и на периферии (рис.4,б). В этих

областях расплава перенос вещества осуществляется диффузионными механизмами, а не с помощью конвекции.

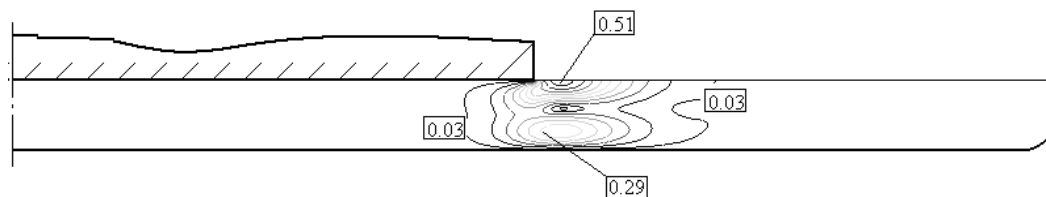


Рисунок 3 – Скорость движения расплава (м/с) в тигле при высоте расплава $H = 0,02$ м

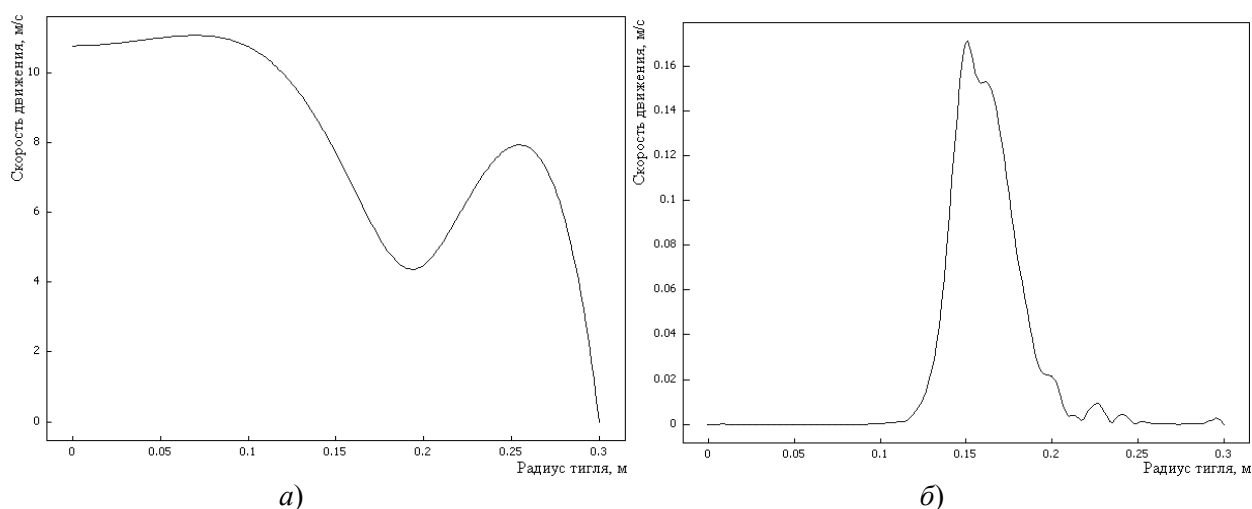


Рисунок 4 – Распределение скорости движения расплава на высоте $0,5H$ от дна тигля

При выращивании монокристаллов кремния методом Чохральского с малой эффективной глубиной расплава будет преобладать донный нагрев тигля, который совместно с вращением монокристалла будет способствовать более однородному распределению кислорода по его сечению [5].

Выводы. Уменьшение глубины расплава в тигле при выращивании моно-кристаллов кремния методом Чохральского обеспечивает стационарный режим развития тепловой конвекции или ее полное устранение. При этом скорость движения расплава уменьшается с 6...10 до 0,06...0,12 м/с. Кроме того, возможно снижение мощности нагревателей, так как нет необходимости нагревать большой объем расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильвидский М.Г. Полупроводниковый кремний на пороге XXI века // Известия вузов. Материалы электронной техники. - 2000. - № 1. - С.14-18.
2. Степченко В.Н., Голубенков Б.Ю. Исследование тепловых условий и конвективных потоков в расплавах кремния большой массы // Электронная техника. Сер. Материалы. - 1982. - Вып.6. - С.44-47.
3. Степченко В.Н., Голубенков Б.Ю., Добрынин А.В. Исследование вынужденной конвекции в расплавах кремния большой массы // Электронная техника. Сер. Материалы. - 1982. - Вып.7. - С.25-28.
4. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности: Пер. с англ. - М.: Мир, 1991. - 143 с.
5. Воронов И.Н., Гришин В.П., Полежаев В.И. и др. Влияние гидродинамики на распределение кислорода при выращивании монокристаллов кремния большого диаметра методом

Чохральского / Теплофизика кристаллизации веществ и материалов. - Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1986. - С.44-57.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2008 р.

Рецензент, проф. Т.В.Критська