

A NUMERICAL ANALYSIS OF CZOCHRALSKI
SINGLE CRYSTAL GROWTH OF SILICON
WITH MISALIGNED CUSP MAGNETIC FIELDS
(Misaligned된 비균일자장이 인가된 초크랄스키
실리콘 단결정 성장에 대한 수치적 해석)

Chang Nyung Kim

ABSTRACT

Melt flow, heat and mass transfer of oxygen have been analyzed numerically in the process of Czochralski single crystal growth of silicon under the influence of misaligned cusp magnetic fields. Since the silicon melt in a crucible for crystal growth is of high temperature and of highly electrical-conducting, experimentation method has difficulty in analyzing the behavior of the melt flow. A set of simultaneous nonlinear equations including Navier-Stokes and Maxwell equations has been used for the modelling of the melt flow which can be regarded as a liquid metal. Together with the melt flow which forms the Marangoni convection, a flow circulation is observed near the corner close both to the crucible wall and the free surface. The melt flow tends to follow the magnetic lines instead of traversing the lines. These flow characteristics helps the flow circulation exist. Mass transfer characteristics influenced by the melt flow has been analyzed and the oxygen absorption rate to the crystal has been calculated and turned out to be rather uniform than in the case of an aligned magnetic field.

1. 서론

최근에 여러 가지 電子機械와 전자광학부품에 많이 사용되고 있는 單結晶은 균일한 原子構造를 갖는 固體로서 音波, 電磁氣波, 電荷粒子등을 散亂시키지 않고 그대로 통과시킨다. 실제로는 이 단결정에 산소 등과 같은 不純物을 적당량 첨가하여 선택적으로 요구되는 특성을 가지도록 제조하고 있다. 최근에 생산되는 單結晶 물질의 대부분은 Czochralski 방법에 의하여 제조되고 있다.

도가니에는 熔融物質과 不純物(impurity)이 녹아 있는데 여기에서 부력에 의한 對流 熱傳達가 발생한다. 또 도가니가 불균일하게 가열되는 경우에 발생하는 熱的인 非對稱 현상을 줄이기 위하여 성장하는 結晶과 도가니를 회전시키는데 이로 인하여 遠心力이 작용하여 melt의 運動은 매우 복잡하게 된다. 表面張力의 勾配는 自由表面에서 熔融物質(melt)의 半徑方向에 따른 溫度勾配에 의하여

keywords : Czochralski Crystal Growth, Silicon, Misaligned Magnetic Field, Numerical Analysis, Oxygen Mass Transfer

야기되는데 이러한 힘의 不均衡때문에 melt는 表面張力이 작은 곳에서 큰 곳으로 이동하게 되어 Marangoni convection(또는 thermocapillary convection)을 발생시킨다.

도가니 벽에서는 구성물질인 Silica의 溶發(ablation)로 인하여 酸素가 melt속으로 용융된다. 少量의 산소는 실리콘안의 금속성 불순물을 제거하는 성질을 가지므로 집적회로(integrated circuit)의 칩(chip)의 항복점을 높여 준다. 이 때 산소의 絶對量뿐만 아니라 均一性도 역시 중요하다. 비균일 자장을 걸어 주는 이유는 부력과 열모세관 현상(thermocapillarity)에 의해 발생하는 自然對流와, 結晶의 回轉에 기인한 強制對流(즉 centrifugal pumping)가 均衡을 이루도록 하기 위해서 이다.[1] 즉 부력과 열모세관 현상(thermocapillarity)가 나타나는 곳에서는 강한 磁場을 걸어주고, 成長表面 근처에서는 강제대류(centrifugal pumping)를 크게 억제하지 않기 위해 약한 磁場을 걸어준다.

도가니안의 용융물질은 전기전도성이 매우 크다. 이러한 용융물질의 유동을 制御하기 위한 magnetic Czochralski방법이 여러 연구자들[2-5]에 의하여 탐구되었다. Melt의 自由表面에서 半徑方向으로 溫度勾配가 생기고 이에 따라 表面張力의 勾配가 생기는데 이것으로 因한 thermocapillary convection이 結晶成長에 미치는 연구가 Schwabel[6]에 의하여 수행되어 졌다. 또 浮力에 의해 發生하는 對流作用을 抑制하여 질이 좋은 結晶成長을 얻고자 하는 實驗이 外界에서 수행되어 졌다[7].

강한 축대칭의 cusp 자장에서 열모세관 현상이 Khine과 Walker[8-9]에 의하여 이론적으로 연구되었다. 여기에서 운동방정식에서 관성항을 무시하며 점성항은 Hartmann 층에서만 고려하였다. 자장의 형태로는 완전한 축방향의 자장과 축대칭의 cusp 자장을 모두 포함하였다. 그러나 이들의 연구는 자장의 세기가 강하여 열전달현상에서 대류의 효과를 무시하는 등의 제한된 조건에서만 근거를 갖고 있다.

자장이 걸려있는 Czochralski 유동에서 boron, gallium, oxygen등의 solute의 거동에 관한 연구가 수행되어져 왔다. Silicon melt에서 boron solution의 流動이 Kim과 Langlois[10]에 의하여 연구되었는데 segregation coefficient가 0.8이므로 boron의 일부가 growth interface에서 rejection을 겪게 되는데 이러한 경우를 數值的으로 처리하였다. Kim과 Langlois[11]는 gallium solute의 濃度勾配가 浮力에 영향을 미치게 되어 速度場과 濃度分布가 서로 影響을 주게 되는데 이때 速度場, 電氣場, 溫度場이 固定(freeze)되어 있다고 생각하면서 濃度を 계산한다면 이는 시간이 상당히 많이 걸리는 계산이 될 것이라는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 자장의 대칭면이 용융물질의 자유표면과 일치하지 않는, 서로 다른 두 가지의 misaligned된 자장이 걸려있는 경우에 대하여 부력, 열모세관, 원심력의 효과가 나타나는 Czochralski 유동장에서 유동 특성을 파악하고 酸素(oxygen)의 거동을 모사하고자 한다. 도가니 안의 용융물질은 고온(용융점 1685K)이며 전기를 통하는 물질이므로 실험적인 방법으로 용융물질의 거동을 연구하기는 매우 곤란하다. 위에서 살펴본 바와 같이 結晶의 成長에 影響을 미치는 因子들이 많고 支配方程式들은 非線形의 형태를 갖게 되기 때문에 數值解析 방법을 이용하여 연구하기로 한다.

2. 문제설정 및 수치계산

2-1. 개요

단결정을 성장시키는 Czochralski 장치의 단면도가 Fig. 1에 제시되어 있다. 회전방향대칭의 Czochralski 유동을 해석하기 위해 도가니의 子午面(meridional plane)에서 微分方程式을 고려한다. 이때 計算領域의 윗쪽은 成長表面과 自由表面으로, 側面은 도가니 벽과 對稱軸으로, 아래쪽은 도가니 바닥으로 區劃되어 있다. 結晶成長 과정에서 melt의 流動을 부드럽고 對稱적으로 만들게 되면 melt의 流動을 制御하기가 쉽기 때문에 이러한 회전방향대칭 形態를 갖는 結晶成長 과정은 실제로 매우 중요하다.[2]

국소 농도구배가 부력에 의한 유동에 큰 영향을 끼치지 않는다면 산소 같은 농도가 낮은 solute의 이동은 수동성(hydrodynamically passive)을 갖는다. 즉 속도장, 전기장, 온도장에 관한 지배방정식과 경계조건은 solute의 거동에 무관하다. 그리하여 melt의 운동은 solute transport와는 무관하여 따로 계산될 수 있다. 산소와 같은 불순물(impurity)들은 확산율(diffusivity)이 매우 낮기 때문에, 자기장의 영향을 받는 Czochralski 유동에서 속도장, 전기장, 온도분포가 정상상태로 유지되는 반면, solute distribution은 계속 시간에 따라 변화하는 경우를 종종 관찰할 수 있다. 이러한 상태가 되면 속도, 전류, 온도를 다시 풀 필요가 없이 이들 값이 고정(freeze)되어 있다고 간주하고 시간에 따른 농도의 변화만을 계산하면 된다.

도가니의 벽에서는 구성물질인 Silica가 용발(ablation)하여 산소가 melt 속으로 들어가며 이 산소의 일부는 결정 속으로 들어가며 다른 일부는 SiO₂의 형태로 자유표면에서 증발한다. 여기에서 증발은 빠른 속도로 이루어지는 반면, 자기장의 영향으로 인하여 대류작용이 억제되고 산소의 확산계수도 매우 작으므로 대류와 확산을 통해 melt의 내부에서 자유표면으로 산소가 이동하는 과정은 매우 느리다. 도가니 벽에 형성된 농도 경계층 안에 있는 유체입자는 벽으로부터 확산 과정을 통하여 산소를 얻고 이 유체입자가 자유표면에 접한 경계층으로 이동한 후 여기에서 역시 확산과정을 통하여 자유표면으로 산소(SiO₂의 형태로)를 잃는다. 산소의 segregation coefficient가 1보다 크므로(1.25) 결정성장표면 바로 아래의 melt에서는 다른 부분의 melt보다 산소의 농도가 낮게 된다.

2-2 지배 구성 방정식

용융상태의 실리콘은 액체금속의 성질을 띠고 있으며 이러한 액체금속의 거동은 Maxwell식과 Navier-Stokes식에 의하여 지배된다. 본 연구에서 사용되는 자장은 자유표면이 대칭면이 되므로 자유표면에서 자장의 수평 성분만이 있으며 수직 성분이 나타나지 않는다. 그러므로 결정 근처에서는 자기장의 세기가 0에 가깝고 자유표면과 중심축에서는 자오면 유동의 속도성분과 평행하기 때문에 유동에 큰 영향을 주지 못한다.

Khine과 Walker[8]에 의해 제시된 $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ 와 $\nabla \times \vec{B} = 0$ 를 만족하는 무차원 형태의 자장은 다음과 같다.

$$\vec{B} = B_r(r, z)\vec{i}_r + B_z(r, z)\vec{i}_z \quad (1)$$

여기에서

$$B_r = cr \quad (2-1)$$

$$B_z = 2c(ab - z) \quad (2-2)$$

$$c = [0.5 + 4b^2(\alpha^2 - \alpha + \frac{1}{3})]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

위 식에서 b 는 무차원으로 표현된 melt의 깊이이다. 식 (2-3)에서 $\alpha = \infty$ 인 경우는 $B_r = 0$, $B_z = 1$ 이 되어 축 방향 자장이 되며, $\alpha = 1$ 인 경우는 $B_z(r, b) = 0$ 인 aligned cusp 자기장이 된다.

본 연구에서는 $\alpha = 1.4$ 및 $\alpha = -0.4$ 인 두 가지 경우에 대하여 해석하였다. $\alpha = 1.4$ 는 자장의 대칭면이 자유표면에 있는 aligned된 경우($\alpha = 1.0$)로부터 약간 일탈(deviation)된 경우로서 자장의 대칭면이 자유표면의 위에 존재하고 있다. 또한 $\alpha = -0.4$ 는 자장의 대칭면이 도가니 바닥의 아래에 존재하는 경우이다. 이러한 자장의 형태가 Fig. 2에 제시되어 있으며 이때 자장은 회전 방향 대칭의 성질을 갖는다. 또 두 가지 경우에 대하여 공간적으로 평균된 자장의 세기는 0.1T로 고정하였다.

용융물질의 유동은 磁性力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 를 포함하는 Navier-Stokes식에 의해 지배받게 되며 여기에서 열팽창은 浮力項에서만 고려하기로 한다. 凝固되는 結晶이 윗쪽으로 끌려 올려지는 속도는 매우 작아 이에 따른 유체 유동은 무시할 만하다고 가정한다. 점성 소산(粘性 疏散)과 Joule heating 및 결정물질의 응고열은 도가니의 바닥과 측면에서 공급되는 열에 비하여 무시할 만하다고 가정하면 對流 현상과 擴散 현상이 균형을 이루는 에너지 방정식이 溫度場을 지배하게 된다. 또 같은 형태의 濃度에 관한 濃度 방정식이 濃度場을 지배한다. 비압축성 유동에 관한 질량 보존의 법칙을 적용하고, 전류의 흐름에 관하여 오옴의 법칙과 電荷보존의 법칙을 사용한다. 회전방향 대칭이 성립할 경우, 자오면에서 속도, 온도, 농도, 전류의 세기 등에 대하여 아래와 같이 지배방정식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \nabla^2 u_r + \rho \frac{u_\theta^2}{r} + \sigma (u_z B_r - u_r B_z) B_z - \mu \frac{u_r}{r^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) &= \mu \nabla^2 u_\theta - u_r \frac{u_\theta}{r} - \mu \frac{u_\theta^2}{r^2} \\ &+ \sigma \left(-\frac{\partial \phi}{\partial z} - u_\theta B_r \right) B_r - \sigma \left(-\frac{\partial \phi}{\partial r} + u_\theta B_z \right) B_z \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho \left(u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g [1 - \alpha(T - T_0)] + \mu \nabla^2 u_z - \sigma (u_z B_r - u_r B_z) B_r \quad (6)$$

$$\frac{\partial J_r}{\partial r} + \frac{J_r}{r} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$J_r = \sigma \left(-\frac{\partial \phi}{\partial r} + u_\theta B_z \right) \quad (8)$$

$$J_\theta = \sigma (u_z B_r - u_r B_z) \quad (9)$$

$$J_z = \sigma \left(-\frac{\partial \phi}{\partial z} - u_\theta B_r \right) \quad (10)$$

$$u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T \quad (11)$$

$$u_r \frac{\partial c}{\partial r} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \nabla^2 c \quad (12)$$

2-3. 경계조건

성장하는 結晶은 각속도 Ω_C 로 회전하고 있으며, 표면온도는 結晶의 熔融 온도 T_S 이다. z -방향 운동방정식으로부터 壓力에 관한 경계조건을 얻을 수 있으며, 結晶 표면은 전기를 통하지 않는다고 가정한다.

자유표면에서는 z 의 변화에 따른 u_r 의 변화율이 반경방향의 온도구배에 비례하므로

$$\frac{\partial u_r}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{d\gamma}{dT} \frac{dT}{dr} \quad (13)$$

이 성립한다. 여기에서 溫度의 변화에 대한 표면장력의 변화율 $d\gamma/dT$ 는 -1.04×10^{-4} N/mK 로 주어진다. 또한 용융물질의 자유표면이 평평하다고 가정한다. 자유표면에서는 주위의 온도가 T_e 로 주어지는 輻射 熱傳達이 일어난다고 가정하고 용융물질 표면에서 자유표면 위의 아르곤 가스로 傳導 또는 對流를 통하여 전달되는 熱傳達이 이러한 輻射 熱傳達에 비해 무시할 만큼 작다고 가정한다.

각속도 Ω 로 회전하는 도가니의 측면 벽에서는 용융 온도 T_S 보다 ΔT ($= 100K$) 만큼 높은 온도인 $T_S + \Delta T$ 가 주어진다. 또 측면 벽은 전기적으로 절연되어 있다. 도가니 바닥 면에서는 도가니 바닥의 중심부 ($T = T_S + \Delta T/2$)에서 도가니 바닥의 가장자리 ($T = T_S + \Delta T$)까지 바닥의 온도가 선형적으로 변화한다고 가정한다.

산소의 舉動에 관한 境界條件을 고려할 때 酸素의 경우에는 도가니 벽에서 용발이 일어나며 自由表面에서는 蒸發이 發生하는데 이에 관한 적절한 modeling이 必要하며 結晶成長表面에서 segregation coefficient가 1보다 크다는 점을 고려해야 한다.

2-4. 수치계산

速度나 壓力으로 표시되지 않는 큰 體積力(body force)이 包含된 流動을 생각할 수 있다. 이러한 體積力이 流動場에서 어떤 物理法則을 만족시키는 변수를 포함하고 있을 때 system에서의 支配方程式을 數值方法으로 聯立으로 계산할 때 필요한 coupling에는 이러한 힘의 효과가 고려되어야 한다.

이러한 경우에 대해 壓力에 관한 Poisson 형태의 식을 얻어 MAC 또는 SMAC방법에서처럼 壓力을 계산하면 數值計算에 있어서 安定的인 解를 얻을 수 있다는 것이 밝혀져 있다[12]. Finite Volume method를 이용하여 慣성과 확산의 효과를 계산함에 있어 power law 방식을 採擇하고, 計算을 遂行할 때에는 Point SOR 또는 Line SOR을 사용한다.

3. 결과 및 고찰

공간 평균된 cusp 자장의 세기가 0.1T일 때, 부력, 열모세관 현상, 원심력 등이 발생하는 Czochralski 유동장의 자오면에서 용융물질의 속도, 온도, 농도 분포 및 결정표면에서의 산소의 흡수량이 해석되었으며 Czochralski 결정성장에서의 여러 특성치가 Table 1에 제시되어 있다.

두 가지 서로 다른 자장에 대하여 자오면에서의 속도분포가 Fig. 3에 제시되어 있다. 이 그림에서 발견되는 유동의 특성은 자장 벡터의 방향(Fig. 2참조)과 전체적으로 일치하도록 속도장이 형성된다는 점이다. 이때, 도가니 벽에서 가열된 용융물질이 자유표면까지 상승한 후 자유표면을 따라 결정이 있는 곳까지 이동하는 현상은 나타나지 않으며 자유표면 및 도가니 벽에 인접한 순환류가 관찰되고 있다. (a)의 경우에는 크고 약한 순환류가, (b)의 경우에는 작고 강한 순환류가 발생하고 있다.

(a)의 경우 도가니 벽의 바닥부터 중간 높이까지의 구간에서는 부력에 의하여 도가니 벽을 따라 상승하는 대류가 발생하고 위에서 언급된 순환류에 의하여 도가니 벽의 위에서부터 중간 높이까지 용융물질이 하강하며, 도가니 벽을 따라 흐르는 두 유동이 도가니 벽의 중간 높이에서 합류하여 도가니의 내부를 향하여 유입한다. 이때 유입하는 용융물질의 온도가 높으므로 부력이 발생하지만 이곳의 자장벡터의 방향특성이 용융물질의 속도벡터에 큰 영향을 미친다. 도가니 내부로 향하는 유동의 일부는 자유표면을 향하여 상승하며 다시 이 유동의 일부는 순환류를 향하고, 다른 일부는 열모세관 현상에 의하여 결정표면으로 이동한다.

자유표면으로 이동한 용융물질의 일부가 열모세관 현상에 의하여 결정 밑으로 이동한 뒤 회전 중심축을 따라 하강하며 다시 도가니 벽면에 도달한다. 여기에서 자오면상의 유동은 결정의 가장자리에서 수직으로 드리워지는 가상적인 면(유동전단면)에 의하여 크게 두 구역으로 나누어지는데 이러한 현상이 온도 및 산소의 농도 분포에 큰 영향을 미친다.

그러나 (b)의 경우에는 순환류의 크기가 커서 내부로 유입하는 유동이 도가니의 아랫부분에서 발생하며, 내부로 유입하는 유동의 속도 벡터는 부력과 국소 자장의 방향특성으로 인하여 내부로 유입함과 동시에 상승하고 있다. 또 이 경우는 결정의 가장자리부터 도가니 벽의 아랫부분까지 매우 작은 유동속도를 갖는 점들이 대각선 방향으로 나타나는데 이는 자장의 방향과 일치한다. 이 작은 속도를 갖는 대각선(유동전단면)을 경계로 자오면에서의 유동이 두 구역으로 나누어진다.

본 연구에서는 비교적 약한 자장이 인가되었기 때문에 자오면에서 온도와 농도분포는 유동의 형태에 크게 의존하게 된다. 대류 열전달에 의하여 형성된 온도분포가 Fig. 4에 제시되어 있다. (a)의 경우에는 유동전단면의 좌측에서 이면에 평행하게 상승하는 유동의 속도가 크므로 이 유동전단면을 가로지르는 방향으로의 온도구배가 크다. 그러나 (b)의 경우에는 유동전단면에 평행하게 흐르는 유동속도가 크지 않아 유동전단면을 가로지르는 방향으로의 온도구배가 크지 않다.

도가니의 바닥과 벽은 산소의 source로서 작용하며, 자유표면으로 이동된

산소는 증발하고, 결정표면에 도달한 산소는 표면으로 흡수된다. 자오면에서의 농도분포도 Fig. 5에 나타난 바와 같이 용융물질의 유동의 형태에 크게 의존하고 있다. (a)의 경우에는 유동전단면에서 농도구배가 크게 나타나 띠(belt) 모양이 형성되고 있으며 도가니 벽의 중간 높이에서 유동장의 내부로 유입하는 유동이 유동전단면에 접근하여 확산의 방식으로 산소를 내부로 전달한다. 또한 자유표면에서도 내부로 향하는 용융물질이 결정에 산소를 공급한다. (b)의 경우에는 유동장 내부로 유입하는 유동이 자유표면 쪽으로 상승하여 유동장 내부에서 용융물질의 교반이 활발하지 않아 역시 유동전단면에서 농도구배가 큰 띠 모양의 구역이 형성된다.

결정 속으로 흡수되는 산소의 양이 결정성장의 초기부터 3000초까지의 시간 경과동안 계산되었다(Fig. 6 참조). 여기에서 (b)의 경우보다 (a)의 경우에서 산소 흡수의 균일성이 높다. 이는 결정부근에서 국소 자장의 세기는 (b)의 경우보다 (a)의 경우가 더 작으므로 이때 결정부근의 유동속도가 덜 억제되기 때문이다. 본 연구에서 얻어진 산소흡수에 관한 특성은 [13]의 결과와 비교될 수 있다. Aligned된 자장의 경우에서 결정으로 흡수되는 산소의 양은 반경방향에 따라 큰 차이를 보이지만 misaligned된 자장의 경우에는 반경방향에 따른 산소 흡수의 균질성이 크게 증가한다.

4. 결론

인가된 자장의 대칭면이 자유표면의 위에 있는 경우와 도가니 바닥의 아래에 있는 경우에 대한 misaligned된 cusp 자장이 인가되었을 때, 이러한 자장의 영향을 받는 Czochralski 실리콘 단결정 성장에서 부력과 열모세관 현상, 원심력 등이 작용하는 용융물질의 유동과 물질(산소)전달 특성이 수치적인 방법으로 연구되었다. 액체금속의 성질을 갖는 용융물질을 Navier-Stokes 식과 Maxwell 방정식을 사용하여 modeling하고 비선형 편미분방정식의 연립방정식을 under-relaxation의 방법으로 수치적으로 계산하였다.

두 가지의 misaligned된 자장에 대하여 용융물질의 속도, 온도, 산소의 농도, 결정속으로 흡수되는 산소의 흡수량 등이 해석되었다. 자장의 세기가 크지 않을 때 도가니 벽에서 가열된 용융물질의 부력과 국소자장의 방향이 자오면에서의 유동특성을 지배한다. 이 유동은 용융물질의 온도와 산소의 농도에 영향을 미치며 결정표면에서의 산소의 흡수에 영향을 미친다.

참고문헌

1. Hicks, T. W. et al., "Oxygen Transport in Magnetic Czochralski Growth of Silicon with a Non-Uniform Magnetic Field," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 94, pp.213-228, 1989.
2. Hoshigawa, K. et al., "Control of Oxygen Concentration in Czochralski Silicon Growth," in *Proc. 4th International Symposium on Silicon Materials, Science, and Technology*, Minneapolis, Volume on Semiconductor Silicon, pp. 101-112, 1981.
3. Kim, K. M. et al., "Apparatus for Czochralski Silicon Crystal Growth Through Axial Magnetic Field Fluid Flow Damping," *IBM Technical Disclosure Bulletin*, Vol. 24, pp. 3376-3377, 1981.
4. Suzuki, T. et al., "CZ Silicon Crystal Grown in a Transverse Magnetic Field,"

- Proc. 4th International Symposium on Silicon Materials, Science, and Technology, Minneapolis, Volume on Semiconductor Silicon, pp. 90-100, 1981.
5. Langlois, W. E. and Walker, J. S., "Czochralski Crystal Growth in an Axial Magnetic Field," Proc. 2nd Int. Conf. on Computational and Asymptotic Methods for Boundary and Internal Layers, Dublin, pp. 209-304, 1982.
 6. Schwabe, D., "Surface-Tension Driven Flow in Crystal Growth Melts," in Crystals, Growth, Properties and Applications, ed. H. C. Freyhardt, Vol. 11, pp. 75-112, Springer Verlag, Berlin, 1988.
 7. Carruthers, J. R., "Crystal Growth in a Low Gravity Environment," Journal of Crystal Growth, Vol. 42, pp. 379-385, 1977.
 8. Khine, Y. Y. and Walker, J. S., "Thermocapillary Convection in a Cylinder with a Strong Non-uniform Axisymmetric Magnetic Field", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 276, pp. 369-388, 1994
 9. Khine, Y. Y. and Walker, J. S., "Buoyant Convection during Czochralski Silicon Growth with a Strong, Non-uniform, Axisymmetric Magnetic Field", Journal of Crystal Growth, Vol. 147, pp. 313-319, 1995
 10. Kim, K. M. and Langlois, W. E., "Computer Simulation of Boron Transport in Magnetic Czochralski Growth of Silicon," Journal of the Electrochemical Society, Vol. 133, pp. 2586-2590, 1986.
 11. Kim, K. M. and Langlois, W. E., "Dopant Segregation in CZ and MCZ Silicon Crystal Growth: A Comparison Between Experiment and Numerical Simulation," Journal of the Electrochemical Society, Vol. 136, pp. 1137-1142, 1989.
 12. Kim, C. N., "Development of a Numerical Method for Full Solution of Magnetohydrodynamic Flow and Application to Fusion Blanket," Ph.D. Dissertation, University of California, Los Angeles, 1989.
 13. Kim, C. N., "Effect of Aspect Ratio of Flow Field on the Melt Motion and Mass Transfer in Magnetic Czochralski Crystal Growth of Silicon," (to be published)

Table 1. Numerical values in the formulation

Crucible radius	R	= 0.2794m
Crystal radius	R _c	= 0.1016m
Crucible depth	L	= 0.2794m
Crucible angular velocity	Ω	= 1.570rad/s (= 15 rev/min)
Crystal angular velocity	Ω_c	= -2.30rad/s (= 22 rev/min)
Magnetic permeability	μ_0	= $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
Electric conductivity	σ	= 1.0×10^6 S/m
Density	ρ	= 2330kg/m ³
Volumetric expansion coefficient	α	= 1.41×10^{-5} /K
Characteristic temperature difference	ΔT	= 100K
Kinematic viscosity	ν	= 3.0×10^{-7} m ² /s
Specific heat	c _p	= 1.0×10^3 J/kgK
Thermal conductivity	k	= 67W/mK
Melting point	T _s	= 1685K
Melt emissivity	ϵ	= 0.318
Pull rate of growing crystal	P	= 2.117×10^{-5} m/s
Initial oxygen concentration	c	= 75.9g/m ³
Oxygen diffusion coefficient	D	= 3.0×10^{-8} m ² /s
Oxygen segregation coefficient	K _s	= 1.25
Oxygen evaporation coefficient	c _{ev}	= 3.36×10^{-6} m/s
Ablation rate	A	= 1.5×10^{-7} kg/m ² s
Temperature derivative of surface tension	d γ /dT	= -1.04×10^{-4} N/mK

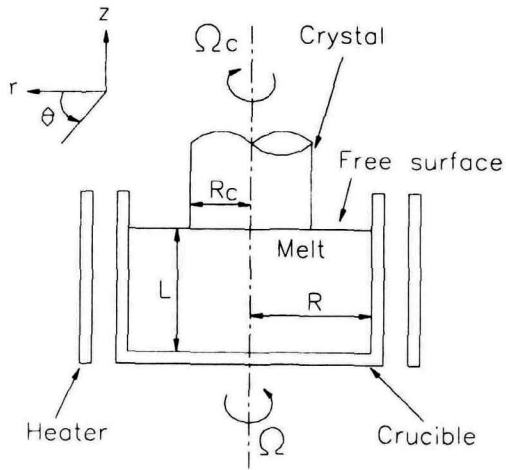


Fig. 1 Czochralski flow field

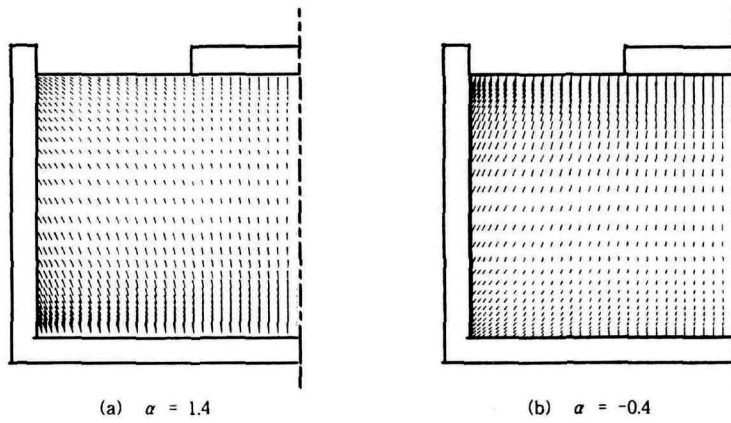


Fig. 2 Misaligned cusp magnetic fields in a meridional plane

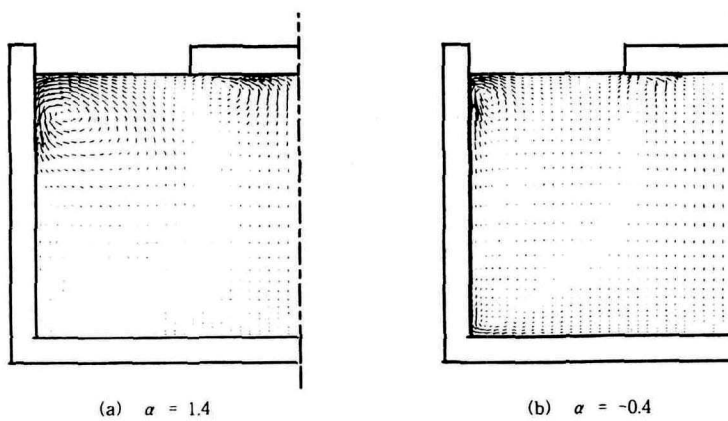


Fig. 3 Vector plot of the velocity fields

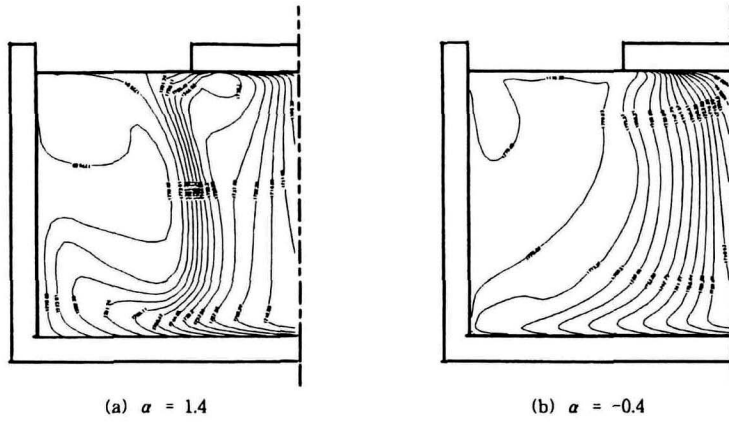


Fig. 4 Temperature distributions

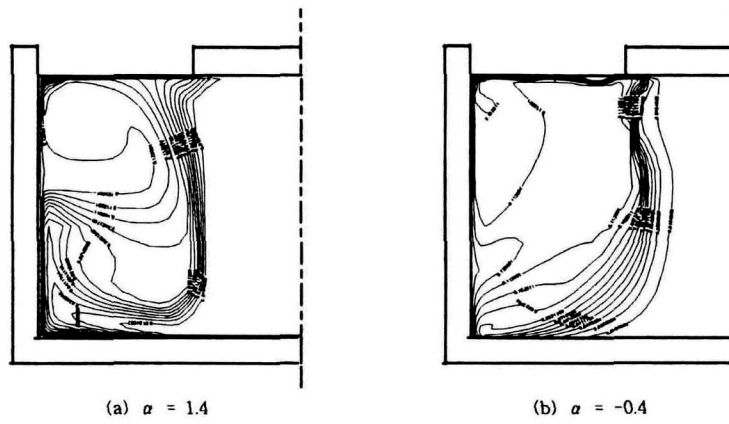


Fig. 5 Concentration distributions

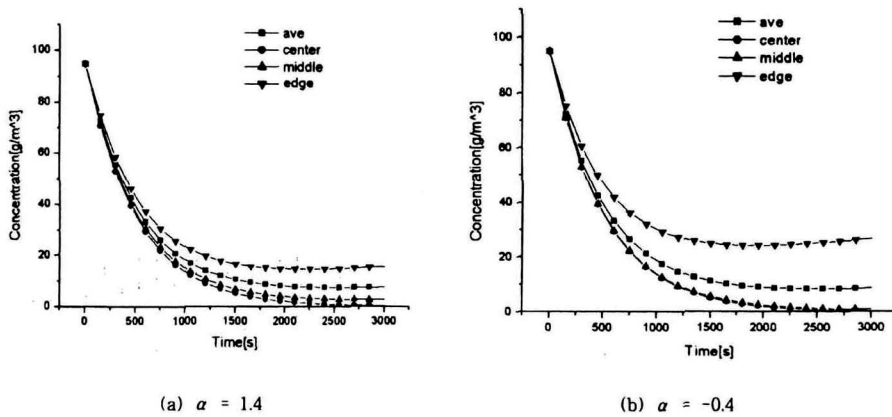


Fig. 6 Oxygen deposition rates