

Effect of asymmetric magnetic fields on the interface shape in Czochralski silicon crystals

Young-Ho Hong^{*,**,*†} and Kwang-Bo Shim^{**}

^{*}Crystal Growth Technology Team, LG Siltron, Gumi 730-724, Korea

^{**}Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received July 8, 2008)

(Accepted July 24, 2008)

Abstract Silicon single crystals are grown by Czochralski (CZ) method in different growing conditions. The different shapes of the crystal-melt interface are obtained with various magnetic fields. Effects of zero-Gauss plane (ZGP) shape and magnetic intensity (MI) on the crystal-melt interface in the crystal experimentally are investigated. The shape of ZGP is not only flat but also parabolic, which is due to magnetic ratio (MR) of the lower to upper current densities in the configurations of the cusp-magnetic fields. As the MR increases, the crystal-melt interface becomes more concave. It means that the hot melt can be easily transported to the crystal-melt interface with increasing the MR. Effective shape of the crystal-melt interface is found to depend on the magnetic field in cusp-magnetic CZ method. The experimental results are compared with other studies and discussed.

Key words Interface shape, Zero Gauss plane, Shape of zero Gauss plane, Magnetic intensity, Czochralski method

Cz 실리콘 단결정에서 비대칭 자기장이 고액 계면에 미치는 효과

홍영호^{*,**,*†}, 심광보^{**}

^{*}LG Siltron, 구미, 730-724

^{**}한양대학교, 신소재공학과, 서울, 133-791

(2008년 7월 8일 접수)

(2008년 7월 24일 심사완료)

요약 Cz법을 이용하여 다양한 성장 조건하에서 실리콘 단결정이 성장되었다. 고액 계면 형상의 차이는 다양한 자기장 분포를 통하여 구현되었으며 결정의 고액 계면에 있어 ZGP(zero-Gauss plane) 형태와 자기장 세기(MI)의 효과가 실험적으로 연구되었다. ZGP의 형태는 커스프 자기장에 있어 상부 및 하부 코일에 인가되는 자기장의 비율(MR)로 인하여 평평하거나 포물선의 형태를 갖게 된다. MR이 증가함에 따라 고액 계면은 더욱 움푹(more concave)의 형태가 되고 이는 MR 증가에 따른 고액 계면으로의 뜨거운 용액이 쉽게 유입될 수 있음을 의미한다. 고액 계면의 효과적인 형상은 자기장 분포에 의존됨을 발견하였으며 실험결과는 다른 연구와 비교하였다.

1. 서론

오늘날 반도체 소자 기관으로 사용되는 실리콘 웨이퍼(wafer)의 약 80% 정도는 초크랄스키(Czochralski) 법으로 성장한 실리콘 단결정으로 만들어지고 있다. 1950년을 전후로 하여 최초로 트랜지스터가 발명되고 실리콘 및 게르마늄 단결정 성장이 가능해진 이후 실리콘에 대한 기술 개발은 매우 급속하게 이루어져 왔고 무엇보다 무어의 법

칙에 따른 디자인 룰 축소로 인하여 수 나노미터 크기의 결함을 제어 하기 위해 무결함 또는 극저결함 웨이퍼의 개발이 가속화 되었다. 이는 보론코프(Voronkov) 이론에 따라 V/G 값의 변화(V; 단결정 인상속도, G; 고액 계면에서의 축방향 온도 기울기)에 따라 임계값보다 클 경우 공공 결함 지배영역이 나타나고 임계값보다 작을 경우 침입형 결함 지배영역이 나타나는 특징을 가지게 된다 [1]. 또한 I/V boundary를 경계로 공공 결함과 침입형 결함이 나뉘게 되고 I/V 경계 영역에서는 열역학적으로 인정하지만 과포화 공공 우세 영역(Cv)와 과포화 침입형 우세 영역(Ci)이 있는데 이 영역을 무결함 영역으로 일컫어진다.

[†]Corresponding author
Tel: +82-54-470-6658
Fax: +82-54-471-7767
E-mail: ir52yhhong@naver.com

실제로 Cz법에 있어 200 mm 이상 대구경 실리콘 단결정 성장을 위해서는 커스프(Cusp) 형태 또는 수평(Horizontal) 형태와 같은 자기장이 사용되어 왔다[2, 3]. 현재까지 자기장의 적용은 대용량 실리콘 용액(melt) 흐름(flow)에 있어 안정된 흐름을 유지하고 자연 대류(natural convection)를 제어함으로써 초기 산소 농도와 같은 품질 제어에 주로 연구가 이루어졌으며 자기장 인가 전후의 산소 농도의 거동 또는 다양한 형태의 자기장 적용 시 용액 변화에 대한 보고가 있었다[3-5].

이와 같이 최근까지 Cz법을 이용한 실리콘 단결정 성장에 있어 주된 연구는 결정 냉각 열이력에 따른 V/G 이론[1]을 바탕으로 결합 영역을 연구하거나 산소농도를 제어하기 위한 자기장의 인가 및 다양한 조건의 파라미터 설계로 국한되었다. 그러나 실제 V/G 이론은 결정뿐만 아니라 용액으로부터 기인되는 열전달 형태에 따라 고액 계면(Crystal-melt interface)의 형상(shape)이 달라지는 점을 설명하는 데는 제한적이다.

한편, Nakamura[6]와 Sim[7] 등은 고액 계면 모양 변화에 따른 일부 수치해석 및 다양한 도가니 위치 및 히터 디자인과 같은 결정 성장 조건에 따라 고액 계면에 미치는 영향에 대한 보고를 각각 한바 있다.

또한, Vizman[8] 등은 EMCZ(Electromagnetic Cz)법을 통하여 수직 형태 및 커스프 형태의 자기장이 고액 계면에 미치는 영향을 수치 해석과 실제 실험 결과물을 비교한 연구를 실시하였다.

이전의 연구에서는 200 mm 실리콘 단결정을 성장하는데 있어 기존에 사용되어온 커스프, 수직, 수평 타입의 자기장 형태와는 다른 새로운 형태인 상, 하부 코일의

인가 전류를 다르게 하여 실리콘 용액에 비대칭 자기장을 인가함으로써 산소 농도 및 비저항에 대한 연구를 발표한바 있다[9, 10].

본 연구는 Cz법을 이용한 200 mm 실리콘 단결정 성장에 있어 다양한 형태의 비대칭 자기장 인가 시 실리콘 용액 흐름의 변화에 따라 고액 계면 형태에 미치는 영향과 산소 농도를 비교하고 시뮬레이션 및 다른 연구 결과와 비교 분석 하였다.

2. 실험

200 mm 직경의 실리콘 단결정 성장을 위해 커스프 타입의 마그넷 장비를 사용한 일반 Cz 법을 사용하였다. Fig. 1은 본 연구를 위해 사용한 Cz 시스템을 보여주고 있다. 여기서 커스프 타입의 자기장(Cusp-magnetic field, CMF)이 실리콘 용액에 인가되었다. CMF는 상, 하부 두 개의 코일로 구성되어 있으며 이때 CMF는 상, 하부 코일에 동일한 전류가 인가 되기 때문에 대칭적으로 평평한 Zero-Gauss plane(ZGP, Magnetic ratio(MR)=1)이 형성이 된다[5, 8]. 여기서 ZGP란 CMF 인가 시 자기장 성분이 수직, 수평 성분에 있어 수직 성분이 zero Gauss인 위치(plane)를 일컫는다. 본 연구에 있어서는 이러한 CMF의 상, 하부 코일에 전류비를 다르게 하여 ZGP는 평평하지 않으며 다양한 형태의 ZGP 형상(MR > 1 in Fig. 1)을 갖게 된다. MR은 하부 코일 전류치에 대한 상부 코일 전류치에 대한 비로써 정의될 수 있다. MR = 1의 경우 상부 자기장 분포와 하부 자기장 분포가 동일

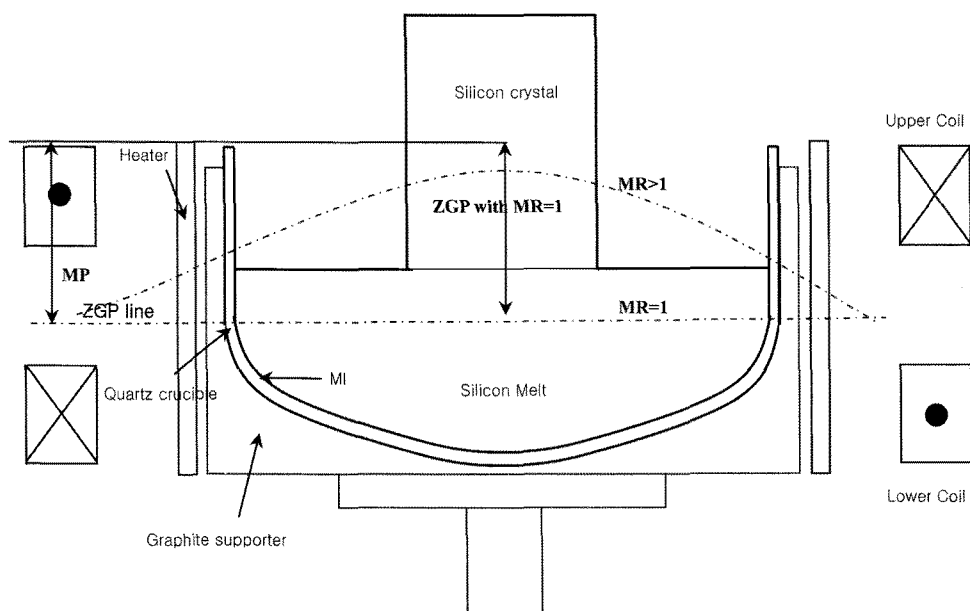


Fig. 1. The Czochralski system with cusp type magnetic apparatus.

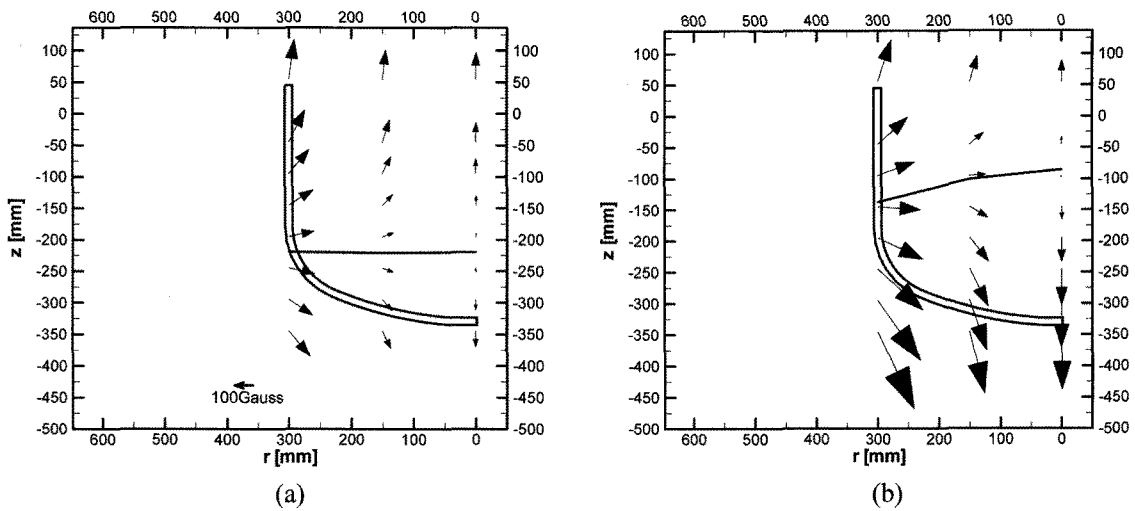


Fig. 2. Distribution of the cusp-magnetic field with MP = 219 mm and (a) MR = 1 and (b) MR = 1.63. ZGP decreases with increasing MR at the fixed MP.

함을 의미하기 때문에 ZGP는 평평하며 CMF의 중간에 위치하게 되고 CMF는 대칭적인 ZGP를 갖게 된다. 이에 반하여 MR > 1의 경우에는 상대적으로 하부 자기장의 분포가 커지게 되어 ZGP는 포물선의 형태로 바뀌게 된다. 또한 마그넷 위치(Magnetic position, MP)는 CMF에 있어 히터 상부로부터 상, 하부 코일 중앙까지의 거리로 정의되는데 MR = 1의 경우 ZGP와 MP는 동일함을 의미한다. 이는 ZGP의 위치는 MR과 MP에 의해 변화될 수 있음을 나타내는 것이다. 자기장 세기(Magnetic intensity, MI)는 히터 상부로부터 260 mm 아래쪽에서 Q'z 석영 도가니 벽에서 직교하는 자기장의 세기로써 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2에는 CMF의 자기장 분포에 있어 MR = 1과 MR = 1.63의 경우이다. 자기장 벡터는 반경 방향으로 150 mm 간격 및 수직 방향으로 50 mm 간격으로 측정되었으며 두 가지 경우에 있어서 상부 코일축의 전류치는 동일하게 하였다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 MP = 219 mm에서 MR을 증가시키에 따라 ZGP는 감소됨을 알 수 있고 도가니 코너의 자기장 강도는 MR 증가함에 따라 MI도 증가함을 알 수 있다.

초기 실리콘 용액의 볼륨은 120~150 kg의 범위로 하였고, 용액의 흐름은 결정과 도가니 회전속도와 같은 요인에 의해 다양한 구동력(flow-driving source)이 영향 받기 때문에[11] 결정 회전 속도 및 도가니 회전 속도는 각각 16 rpm과 0.5 rpm으로 고정하였다. 아르곤 유속과 로내 압력 또한 고정하였으며 결정의 직경을 유지하기 위해 인상 속도(mm/min)를 제어하였다.

얻어진 실리콘 단결정에 대하여 축방향으로 결정의 버티컬 샘플을 채취한 후 800도 4시간, 1000도 16시간의 2 단계 열처리를 통하여 X-ray topography(XRT) 분석을 실시하였다. XRT 분석을 통해 MR수준에 따른 고액

계면의 변화를 시뮬레이션 결과 및 산소 농도 결과와 비교하였다. 유동 패턴을 비교 분석하기 위해 사용된 시뮬레이션 코드는 STHAMAS 3D를 이용하였으며 실제 실험 조건과 동일하도록 Cz로를 적용하였다. Cz 시스템에서 사용된 코드의 타당성은 다른 연구들에 의해 증명되었고[12] 산소 농도는 푸리에 변환(Fourier transfer infrared spectocscopy, FTIR)법에 의해 측정되었다. MR 변경에 따른 고액 계면의 변화가 실제 점결함 거동에 미치는 영향은 다음 논문에서 자세히 논의토록 하겠다.

3. 결과 및 토론

Table 1은 MP를 고정하고 하부 코일의 전류치를 조정함으로써 다양한 MR에서의 ZGP위치 이동 및 MI를 나타내었다. 이는 Fig. 1, 2에서와 같이 MR 증가에 따라 ZGP의 형상이 MR = 1의 경우 평평한 형태에서 MR > 1과 같이 증가함에 따라 ZGP의 형태가 포물선의 형태로 전환됨을 의미하며, 하부 코일의 상대적인 전류치가 높음으로 인한 현상으로 이해될 수 있다. Fig. 3은 다양한 MR에서의 고액 계면의 형태 변화에 대하여 실험결과 및 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 고액 계면의 형상은 MR의 증가에 따라 더욱 음각의 형태로 나타나고 중

Table 1
ZGP and MI with MP = 219 mm and various MR

	MR = 1	MR = 1.4	MR = 1.6	MR = 2	MR = 2.3
Center of ZGP (mm)	219	152	127	61	24
MI (G)	22	53	76	117	174

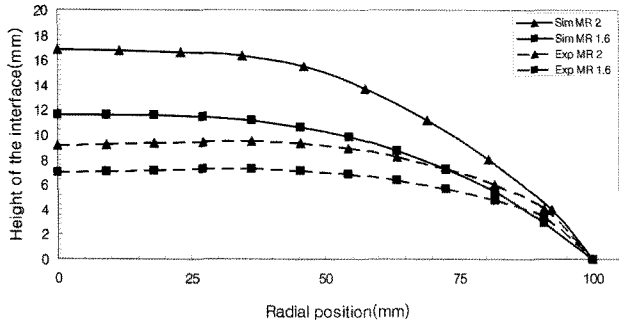


Fig. 3. Numerically calculated and experimentally measured the shape of the crystal-melt interface in various MR, where sim and exp represent numerical simulation and experimental results.

심부에서의 높이는 시뮬레이션에서는 11.62, 16.83 mm 실험 결과는 7.0, 9.2 mm 각각 나타나 MR 증가에 따라 고액 계면 형태의 변화가 동일한 경향성을 보여 실험결과와 수치해석의 결과가 잘 일치됨을 보여준다. 이는 실리콘 용액에 인가되는 비대칭 자기장의 형태에 따라 고액 계면의 형상에 영향을 미침을 보여주는 증거이다. Sim[7] 등은 용액의 높이(Melt Level, M/L)에 따라 고액 계면의 형상 변화에 대한 연구에서 M/L이 증가함에 따라 고액 계면의 높이가 감소됨을 나타내었고 이를 점결함 중 flow pattern defect(FPD)의 평균 밀도에 대하여 FPD가 사라지는 임계 V값, 즉 인상속도가 점차 낮아짐을 보고하였다. 대용량 실리콘 용액에 있어 CMF의 인가는 특히 Q'z 도가니 측벽에 강자기장을 형성한다. 그러나 본 실험은 MR을 변형한 비대칭 자기장을 형성함으로써 실리콘 멜트내 자기장의 분포를 기존과 다르게 적용하였다(Table 1, Fig. 2). 이는 MR의 증가는 하부 코일에 의한 자기장 분포가 실리콘 용액에 미치는 영향이 더욱 커짐을 의미하고 도가니 회전에 의한 강제 대류(forced convection)와 자연 대류(natural convection)가 억제됨을 의미한다. 반면 MR 증가로 인하여 포물선 형태를 나타내는 ZGP 즉, 도가니 중심부 ZGP의 감소는 고액 계면 근방에 자기장 세기를 감소시킴으로써 실리콘

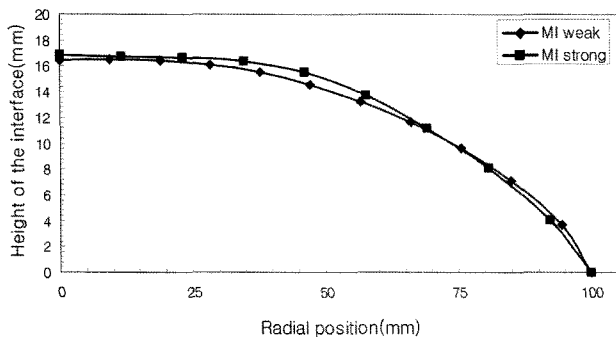


Fig. 4. Calculated shape of the crystal-melt interfaces with various MI at a fixed MR = 2.

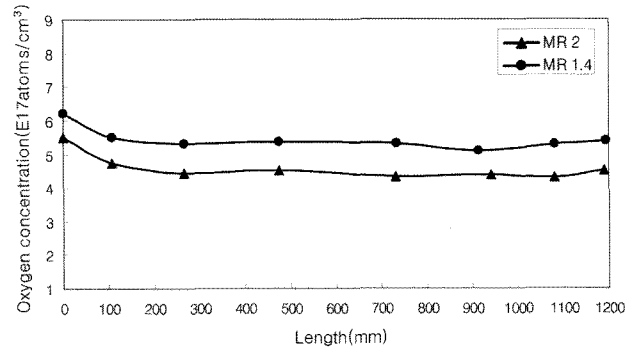


Fig. 5. Oxygen concentration with various MR (ZGP).

단결정 회전에 의한 강제 대류가 보다 활성화되고 뜨거운 용액(Hot melt) 유입이 원활해짐으로써 고액 계면 근방의 수직 온도 기울기(G)가 향상되어 결과적으로 고액 계면의 상승을 유발하였다고 사료된다.

Fig. 4는 MR을 고정하고 MI를 변화시키기 위하여 동일한 비율로 상부 코일 및 하부 코일의 전류치를 변화시켰을 때 고액 계면의 변화를 나타낸다. MI가 변하더라도 MR이 일정할 경우 ZGP의 형상은 유지된다. 이는 실리콘 용액에 미치는 자기장 분포의 영향이 결정과 도가니 회전과 같은 강제 대류 셀의 크기가 MR의 수준에 따라 변하게 되지만 MR이 일정한 경우 고액 계면의 형상이 일정하게 유지될 수 있음을 보여주는 결과이다.

이전의 결과에서는 자기장 분포의 변화에 따른 산소 농도 변화에 대해 고찰하였다[9]. 본 실험을 통해 Fig. 5에 나타난 바와 같이 비대칭 자기장을 인가한 고액 계면의 변화 또한 ZGP 형상 제어를 통해 가능성을 확인하였는데 이것은 MR을 증가시켜 CMF 하부에 강한 MI가 형성되어 대용량 실리콘 용액의 흐름을 억제하고 더욱 안정된 용액의 흐름을 만듦으로써 저산소 농도 구현에 효과가 있음을 발견하였다. 또한, ZGP를 고정(MR is fixed)하고 MI를 변화시킴으로써 고액 계면을 일정하게 유지한 상태로 산소 농도를 선택적으로 제어 가능하게

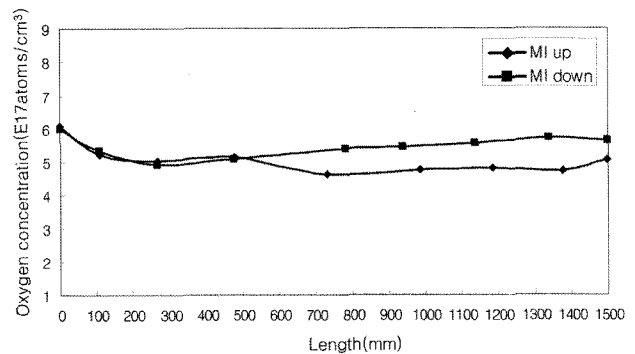


Fig. 6. Effect of changed MI on the oxygen concentration along the axial direction at fixed MR.

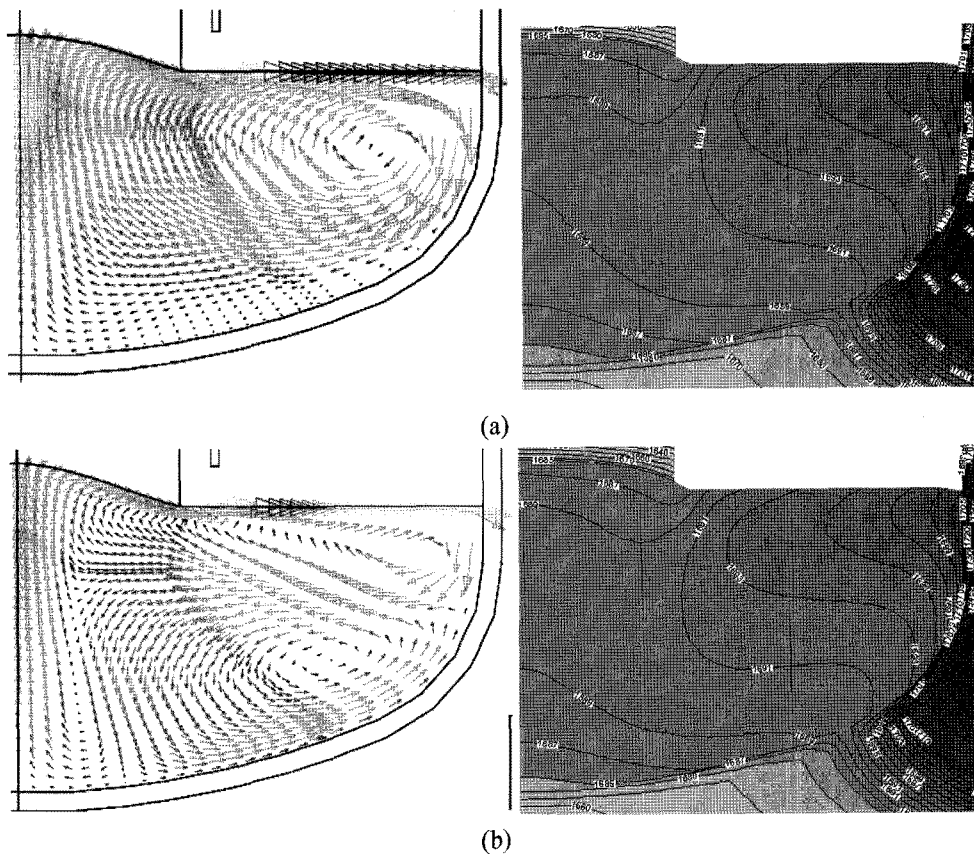


Fig. 7. Velocity and temperature field with MR = 1.6 (a), (b) 2.3.

되어 무결함 또는 극저결함 제조 시 품질의 마진 변화 없이 요구되는 산소농도의 제어가 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 6는 실리콘 단결정 성장 시 150 kg charge한 후 동일 조건 하에서 MR을 2로 고정하되 600 mm 이후에 대하여 길이 별로 MI를 달리 하였을 경우 산소 농도의 변화를 나타낸 그래프이다. 결정의 500 mm까지는 산소 농도의 수준이 동일하지만 600 mm 이후부터 실리콘 용액에 미치는 자기장 세기의 변화로 산소 농도 수준에 차이가 발생한다. 즉 MI를 감소 할 경우 산소 농도가 높은 약 $5.387E17 \sim 5.72E17$ 로 높은 반면에 MI 증가의 경우 산소 농도는 $4.613E17 \sim 5.066E17$ 로 저감되는 것을 확인할 수 있으며 기타 다른 품질의 변동은 없어 Fig. 4 및 Sim[7] 등이 보고한 결과를 뒷받침해준다.

Fig. 7은 MR 1.6 및 2.3에 대한 시뮬레이션 결과로써 대표적인 유동 형태를 나타낸다. 유동장은 크게 두 개의 환형 셀을 보이고 있다. 내측의 셀은 실리콘 단결정 회전(16 rpm)에 의해 형성되었으며 외측의 셀은 도가니 회전(0.5 rpm)과 자연대류에 의해 기인된 것이다. 예상한 바와 같이 MR의 증가에 따라 V_{max} 의 값은 4.424와 3.968 cm/s로 실리콘 용액의 속도가 감소되었고 대류는 억제되었다. MR 증가에 따른 실리콘 멜트 내 약한 대

류는 반응에 의한 Q'z 석영 도가니와 용액 계면간의 낮은 산소 용해도를 유도하게 된다. 이러한 결과들을 바탕으로 Cz법을 이용한 실리콘 단결정 성장 시 비대칭 자기장을 이용하여 상, 하부 코일의 인가 전류를 다르게 적용함으로써 MR에 의한 ZGP형상의 변화는 산소 용해를 제어할 수 있다고 판단된다. 또한, 우측의 등온선(isothermal line)에 있어 고액 계면 근방의 등온선 간격이 좁아짐을 알 수 있는데 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 MR의 증가로 실리콘 용액에 미치는 자기장의 분포의 변화를 통해 V_{max} 값은 감소되었으나 ZGP의 감소로 인하여 고액 계면 근처의 자기장 세기의 감소를 수반하여 등온선의 간격이 좁아져 뜨거운 용액의 유입이 활성화됨을 보여준다. 이러한 결과를 바탕으로 MR 수준에 따른 ZGP 형상 제어는 산소 용해를 포함한 대용량 용액 거동을 변화시킬 수 있을 뿐만 아니라 고액 계면의 형상을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

Cz법을 이용한 200mm 직경의 실리콘 단결정을 성장함에 있어 CMF 인가 시 상부, 하부 코일의 전류치 변

화에 따른 MR, ZGP 형태, MI가 고액 계면에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 연구되었다. 고액 계면의 형태는 MR, ZGP 형태에 따라 제어가 가능하며 ZGP가 감소 또는 MR이 증가함에 따라 고액 계면의 형상은 더욱 움푹(more concave)의 형상을 나타내고 산소 농도는 감소되었다. ZGP 감소, MR 증가, 강한 MI는 실리콘 용액을 전반적으로 억제하여 용액의 흐름을 더욱 안정되게 한다. 안정된 용액의 흐름은 Q'z 석영 도가니와 용액 사이의 계면에 산소 용해에 영향을 미쳐 결정의 산소 농도 저감에 영향을 미치게 된다. 반면 ZGP가 일정한 경우 MI가 증가하더라도 고액 계면의 형태는 유지되고 산소 농도는 감소되었다. 이는 점결함과 같은 품질의 마진 변화 없이 요구 되는 산소 농도의 제어가 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] V.V. Voronkov, "The mechanism of swirl defects formation in silicon", J. Crystal Growth 59 (1982) 625.
- [2] Y. Won, K. Kakimoto and H. Ozoe, "Transient three-dimensional numerical computation for unsteady oxygen concentration in a silicon melt during a Czochralski process under a cusp-shaped magnetic field", J. Crystal Growth 233 (2001) 622.
- [3] K. Kakimoto, "Oxygen distribution in silicon melt under inhomogeneous transverse-magnetic fields", J. Crystal Growth 230 (2001) 100.
- [4] K. Hoshikawa and X. Huang, "Oxygen transportation during Czochralski silicon crystal growth", Mater. Sci. Eng B 72 (2000) 73.
- [5] M. Watanabe, M. Eguchi and T. Hibiya, "Flow and temperature field in molten silicon during Czochralski crystal growth in a cusp magnetic field", J. Crystal Growth 193 (1998) 402.
- [6] K. Nakamura, S. Maeda, S. Togawa, T. Saishoji and J. Tomioka, "Effect of the shape of crystal-melt interface on point defect reaction in silicon crystals", ECS Proceeding 17 (2000)31.
- [7] B.C. Sim, Y.H. Jung, J.E. Lee and H.W. Lee. "Effect of the crystal-melt interface on the grown-in defects in silicon CZ growth", J Crystal Growth, 299 (2007) 152.
- [8] D. Vizman, M. Watanabe, J. Friedrich and G. Muller, "Influence of different types of magnetic fields on the interface shape in a 200 mm Si-EMCZ configuration", J. Crystal Growth 303 (2007) 221.
- [9] Y.H. Hong, B.C. Sim and K.B. Shim, "Effect of zero-Gauss plane and magnetic intensity on oxygen concentration in cusp-magnetic CZ crystals", J Crystal Growth 295 (2006) 141.
- [10] Y.H. Hong, B.C. Sim and K.B. Shim, "Distribution coefficient of boron in Si crystal ingots grown in cusp-magnetic Czochralski process", J. Crystal Growth 310 (2008) 83.
- [11] V. Galindo, G. Gerbeth, W. von Ammon, E. Tomzig and J. Virbulis, "Crystal growth melt flow control by means of magnetic fields", Energy Conversion Manage. 43 (2002) 309.
- [12] D. Vizman O. Grabner and G. Muller, "Three dimensional numerical simulation of thermal convection in an industrial Czochralski melt: comparison to experimental results", J. Crystal Growth 233 (2001) 687.