

초크랄스키 실리콘 단결정에서 인상 속도의 거시적 변동이 성장 결함 형성에 미치는 영향

박봉모 · 서경호 · 김 건
LG실트론, 단결정기술팀

Effects of a Macroscopic Fluctuation in Pulling Rate on the Formation of Grown-in Defects in Cz-Si Single Crystal

Bong Mo Park, Gyeong Ho Seo and Gun Kim
LG Siltron Inc., 283, Imsoo-dong, Kumi, Kyungbuk, 730-350, Korea

요 약

200 mm Cz-Si 결정 성장 시 거시적 인상속도 변동을 인위적으로 도입하였을 때, 인상속도 변화와 이미 성장된 결정 내에서의 성장 결함 형성 거동의 관계를 비교하였다. OSF-링과 FPD 발생 영역의 직경은 변동효과 발생 시 약 1100°C 이상 온도구간에서 영향을 받으며, 이에 따라 COP 생성도 영향을 받는다. ΔO_i 와 BMD는 변동효과 발생 시 약 1000°C 부근 온도에서 영향을 받는다. 따라서, 거시적 인상속도 변동 발생시 성장 계면으로부터 약 150 mm 구간의 결정은 성장 결함 형성 거동이 영향을 받으므로 품질 관리되어야 한다.

Abstract

In a 200 mm Cz-Si crystal, a macroscopic fluctuation in pulling rate was intentionally introduced then the variations of the pulling rate and the formation behaviors of grown-in defects were compared. The diameters of the OSF-ring and the FPD area were affected by the fluctuation in the region above 1100°C. The COP density depended on the diameter of the OSF-ring. ΔO_i and BMD were affected by the fluctuation in the region near 1000°C. As the result, when a macroscopic fluctuation in pulling rate is introduced, the quality of crystal in the region of 150 mm from the growth interface should be reviewed carefully because it can be affected by the fluctuation.

1. 서 론

최근 10년간, 반도체 제조 공정에서 미세 가공 기술의 발달로 초고집적(ULSI) 소자의 제작 기술이 급속하게 발달되면서, COP(crystal originated particle)¹⁾ 처럼 결정 내에 존재하는 서브마이크론(sub-micron) 크기의 결정 결함에 대한 중요성이 크게 대두 되었다.^{2,3)} 이러한 미세 결정 결함들은 소자의 수율(yield)에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로, 현재 반도체 제조 공정의 효율 향상을 위해서는 고품질

실리콘 웨이퍼(wafer)의 사용이 필수적 전제 조건으로 인식되고 있다.

초크랄스키(Czochralski) 법으로 성장한 실리콘(Cz-Si) 단결정은 i-v 경계를 중심으로 바깥 쪽에는 격자간-실리콘(self-interstitial)이 우세하고 안 쪽에는 공공(vacancy)이 우세한 두 가지의 점결함 특성 영역을 나타낸다.⁴⁻⁹⁾ i-v 경계 약간 안 쪽의 약한 공공 우세 영역에서는 산화유기적층결함(Oxydation-induced Stacking Fault: OSF)-링(ring)이 형성되는 것으로 잘 알려져 있다.⁷⁾ OSF-ring의 안쪽 영역에서

는 COP(crystal originated particle)나 FPD(flow pattern defect) 등으로 표현되는 공공관련 성장결함(grown-in defect)이 주로 생성된다. 반면에, i-v 경계 밖의 격자간-실리콘 우세 영역에서 점결함의 과포화도가 지나치게 높을 경우 전위루프(dislocation-loop)가 형성될 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾

고품질 Cz-Si 웨이퍼의 효과적 생산을 위해서 단결정 봉(ingot) 성장 시 주요 성장 결함(grown-in defect)의 형성을 적절하게 제어해야 하는데, 특히 단결정 봉의 성장 축 방향을 따라 균일한 결함 분포를 갖도록 제어할 필요가 있다. 이 때 가장 중요한 요소는 인상 속도(pulling rate)의 제어라 할 수 있다. Cz-Si 단결정 성장 시, 점결함 특성 영역의 형성은 [성장속도(V)/온도구배(G)] 값에 따라 크게 의존하는 것으로 알려져 있는데,^{7,11)} 결정 성장로 내의 단열 구조물의 설계와 재질에 따라 온도 구배 조건은 거의 정해져 있는 것으로 볼 수 있으므로 보통은 성장 속도 크기를 변화시켜 성장되는 결정의 결함 품질 특성을 제어하고 있다.

결정 성장 속도와 직접적으로 연관되는 인상 속도의 제어는 미시적(microscopic) 변동과 거시적(macroscopic) 변동의 두 가지 측면을 고려할 수 있다. Cz-Si 단결정 성장 시, 성장 결정의 직경 제어를 위하여 용액 온도 제어와 함께 인상 속도의 제어가 연동하기 때문에 미시적 변동을 완전히 소거하기는 어렵다. 또한, 최근의 연구 결과에 의하면, 이러한 미시적 변동에 대하여서는 점결함 특성 영역 분포가 크게 영향을 받지 않는 것으로 보고되었다.¹²⁾ 결정 성장 중 공정 불안 등에 의하여 거시적 인상 속도 변동이 유발되는 경우도 가끔 있으며, 비교적 큰 파형의 거시적 인상 속도 변동이 도입될 경우 성장 결함의 형성 거동이 영향을 받게 될 것으로 추정되지만 그 효과가 뚜렷하게 알려져 있지는 않다. 특히, 거시적 변동이 발생하였을 때, 이것이 이미 성장된 결정의 냉각 열이력(thermal history)에 영향을 미쳐 성장 결함 거동에 변화가 생기게 되고, 따라서 결정의 품질 가치를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 그러나 이러한 효과에 대하여서는 다소 막연한 추정만 이루어지고 있을 뿐 아직 이렇다 할 연구 결과 보고는 별로 없는 편이다.

본 연구에서는, 인상속도 변동과 성장 결함 형성

거동과의 상관 관계에 대한 이해를 위하여, 200 mm CZ-Si 결정 성장 시 인상속도의 거시적 변화가 도입된 경우 변동 도입 이전에 성장된 결정내의 COP, FPD, OSF-링, BMD(bulk micro-defect) 등의 여러 가지 성장 결함에 대한 형성 거동을 비교 분석하였다. 이를 통하여 거시적 인상 속도 변동의 영향을 파악하고, 인상 속도 변동 발생 시 이의 관리 기준을 제안하고자 한다.

2. 실험 방법

2-1. 결정성장

상용의 대형 Cz-Si 결정성장로를 이용하여 200 mm 직경의 Boron이 소량 첨가된 P-형 실리콘 단결정을 [100] 방향으로 성장시켰다. 성장된 결정의 비저항(resistivity)은 8~12 Ωcm이며, 초기 산소 농도는 12~14 ppma(ASTM F121-83, new ASTM)이다. 인상속도 변동의 효과를 관찰하기 위하여 Fig. 1의 "A" 부분처럼 거시적 인상속도 변동이 인위적으로 도입된 결정을 성장하였다. 결정의 성장 축 방향을 따라 약 60 cm 부근에서 평균 인상속도 0.475 mm/min에 대하여 ±35% 수준의 진폭으로 인상 속도 변동을 도입하였다.

2-2. 시편용 웨이퍼의 제작

Fig. 1의 "A" 영역은 심한 변동 효과에 의하여 결

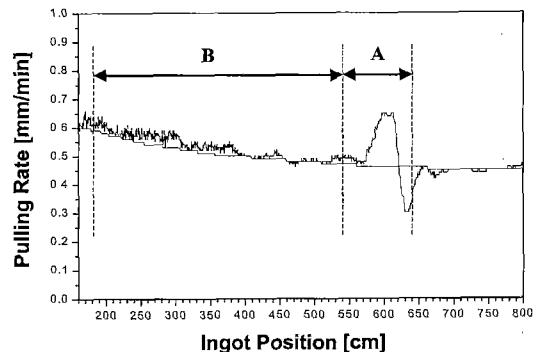


Fig. 1. Pulling rate profile along the growth direction. A macroscopic fluctuation was introduced intentionally in the region "A". The crystal in the region "B" was sliced and sample wafers were selected for the investigation of the formation behaviors of various grown-in defects.

정의 성장 결함 특성이 직접적으로 영향을 받는 곳으로, 보통 이 정도의 충격은 결정 직경 제어 등의 불완전성을 유발하므로 정상 제품으로 사용하기 어려운 부분이다. 그러므로, 여기서는 “A” 영역에서 발생한 인상 속도 변동이 “B” 영역의 결함 특성에 어떠한 영향을 주는 지를 이해하는 것에 더 관심이 크다고 할 수 있다. 이를 분석하기 위하여, 성장된 실리콘 단결정 봉에서 Fig. 1의 “B”로 표시된 영역을 wire saw로 슬라이싱(slicing) 하였다. 슬라이스된 웨이퍼를 약 1 cm 간격으로 1장씩 뽑아서 표면의 기계적 손상 층을 충분히 식각한 후 웨이퍼의 원래 위치를 알 수 있도록 레이저(laser) 표식을 새겨 넣었다. 에치(etch)된 웨이퍼를 다시 세정한 후 한면을 경면 연마(mirror polishing) 하였다. 경면 연마된 시편 웨이퍼를 최종 세정한 후 카세트에 담고 완전 밀폐 포장하여 보관하였다.

2-3. 성장 결함 측정

경면 연마된 모든 시편 웨이퍼에 대하여, Tencor사의 SPI particle counter를 이용하여 LLS(localized light scatterer)를 측정하였다. LLS는 웨이퍼 표면에 존재하는 COP와 real particle를 모두 측정할 것으로, 약 80% 이상 대부분이 COP에 해당된다. 따라서, 측정되는 LLS의 경향성으로부터 결정 내에 형성된 COP의 거동을 유추할 수 있다. 0.10~0.20 μm 범위에 대하여 0.02 μm 간격으로 LLS의 크기 분포를 측정하였다.

LLS 측정을 마친 시편 웨이퍼를 대략 2 cm 간격이 되도록 교차로 묶어서 두 그룹으로 분리하였다. 한 그룹의 시편은 30분간 Secco 에칭 한 후 광학 현미경 하에서 FPD를 측정하였다. 이때 웨이퍼 직경을 따라 10×10 mm² 크기의 구간으로 나누어 각 영역 내에 존재하는 FPD의 수를 측정하였다. 나머지 한 그룹의 시편은 800°C에서 4시간 그리고 1000°C에서 16시간의 2단계 열처리한 후 Semilab사의 WT-85X를 이용하여 μ -PCD(photo-conductivity decay) lifetime map을 스캐닝하였으며, 이로부터 OSF-링의 직경을 측정하였다. 열처리 전후 시편의 산소농도를 Bio-Rad사의 FTIR(QS-500)을 이용하여 측정 비교함으로써 ΔO_i 를 측정하고, 동일 시편을 경사면 연마(angle polishing)한 후 광학 현미경 하에서 BMD를

측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. OSF-링 형성 거동

OSF-링 주변 영역에서는 산소 석출 거동이 민감하게 변하므로, 산소 석출을 증진시키는 800°C에서 4시간 그리고 1000°C에서 16시간의 2단계 열처리한 후 μ -PCD lifetime map을 스캐닝 하면 비교적 쉽게 OSF-링 위치를 관찰할 수 있다.⁹⁾ 이러한 결과를 Fig. 2(a)에 나타내었는데, 결정 성장 축 방향의 위치에 따른 OSF-링의 위치 변화를 한눈에 쉽게 파악할 수 있다. 이로부터 측정된 각 위치에 따른 OSF-링의 직경을 그래프로 나타내면 Fig. 2(b)와 같이 나타난다. 성장된 결정의 약 450 mm 지점까지는 OSF-링 직경이 점차적으로 감소하다가 그 이후부터는 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

Cz-Si 단결정 성장 시, OSF-링의 형성도 [성장속도(V)/온도구배(G)] 값에 따라 크게 의존한다.^{7,11)} 일반적으로 온도 구배는 성장 결정의 후반부로 갈수록 점점 감소하는 경향을 나타내므로, 이에 의하면 OSF-링의 직경은 증가되어야 한다.¹²⁾ 그러나, Fig. 2에 의하면 OSF-링 직경은 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Fig. 1의 “B” 영역에서 평균적 인상속도가 감소하기 때문으로 해석된다. 온도 구배 감소 효과보다 성장 속도 감소 효과가 지배적인 결과 V/G 값이 감소하게 되어 결과적으로 OSF-링의 직경이 작아지게 되는 것이다. 성장된 결정의 약 450 mm 이후 영역에서는 OSF-링의 직경이 다시 증가하는 양상을 나타내는데, 이는 Fig. 1의 “A”의 인상속도 변동의 효과에 의한 것으로 이해된다. 약 450 mm 지점은 거시적 인상속도 변동이 도입될 당시 성장계면으로부터 약 100 mm 정도의 거리에 있는 약 1100°C 정도의 온도대에서 냉각되는 부분이므로, 이 이상의 온도 대에서는 인상속도 변동에 의하여 OSF-링의 형성이 영향을 받는 것으로 보여진다.

3-2. FPD 분포 영역

성장된 결정 내의 각 위치에 대한 FPD 밀도는 약 200 ea/cm² 이하 수준으로 위치 변화에 따라 큰 변화를 나타내지는 않았다. 그러나, Fig. 2에 나타낸 OSF-

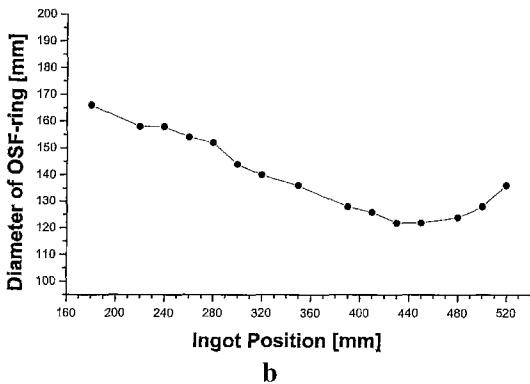
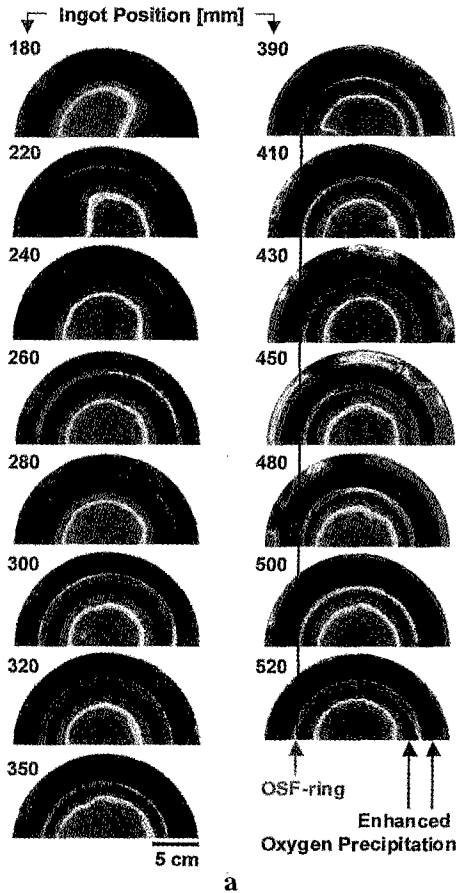


Fig. 2. The variation of the OSF-ring position in the region “B” of the crystal grown as in the Fig. 1. (a) μ -PCD lifetime maps after 2-step heat treatment, the diameter of the OSF-ring could be measured at each position. (b) The axial profile of the measured diameter of the OSF-ring from (a).]

링의 직경 변화와 거의 유사한 FPD 분포 영역의 크기 변화를 나타내는 것이 관찰되었으며, 이는 Fig. 3

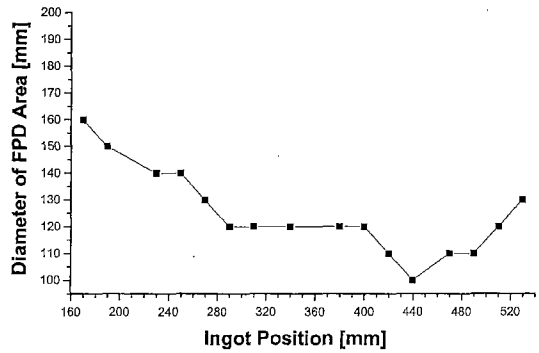


Fig. 3. The variation of the diameter of the FPD area in the region “B” of the crystal grown as in the Fig. 1.

에 나타낸 바와 같다. FPD 분포 영역의 직경 변화가 OSF-링의 직경 변화보다 계단식으로 변하는 것처럼 보이는 것은 FPD 측정 방식이 10 mm 간격의 셀(cell) 단위로 이루어 지기 때문이다. 일반적으로 OSF-링의 안 쪽 영역이 공공관련 결함이 형성되는 영역이므로, OSF-링의 직경 변화와 FPD 분포 영역의 직경 변화가 같은 거동을 나타내는 것은 당연한 결과로 이해된다.

3-3. LLS 및 COP 형성 거동

대부분의 LLS는 COP에 기인하는 것으로 밝혀져 있으므로, LLS 측정 결과로부터 COP의 거동을 추정할 수 있다. 원래 particle이란 것은 웨이퍼 표면에 흡착되어 있는 이물을 말하는 것이다. J. Ryuta¹에 의하여 이물이 아닌 결정 결함에 기인한 표면 피트(pit)가 particle로 인식되는 것이 발견되었으며, 이를 COP라 부르게 되었다. COP는 과포화된 공공이 응집된 공동(void) 결함에 해당되며, 주로 1150°C에서 1080°C 사이의 온도 구간을 통하여 냉각될 때 생성되는 것으로 알려져 있다.¹³⁾ 따라서 해당 온도 구간에 대한 성장 결정의 냉각 열이력에 변화가 생기면 COP 생성 거동도 영향을 받을 수 있다.

Tencor-SP1 particle counter에서 측정된 LLS를 Fig. 4에 나타내었다. 측정 결과를 비교하여 보면, 0.14 μ m 이상 크기의 LLS는 결정의 위치에 상관없이 거의 일정한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 0.12~0.14 μ m 크기의 LLS 수준은 결정 위치에 따라 점차 감소하다가 약 450 mm 이후 영역에

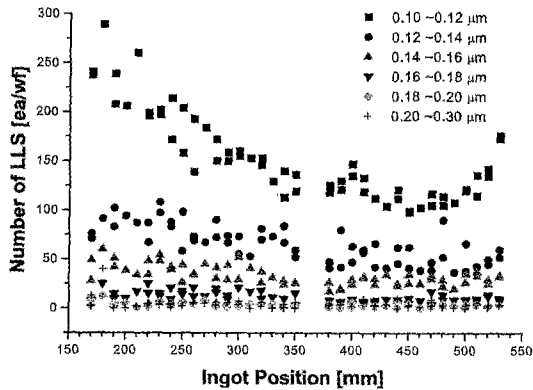


Fig. 4. The variation of the LLS density in the region "B" of the crystal grown as in the Fig. 1.

서는 다시 증가하는, Fig. 2의 OSF-직경 변화나 Fig. 3의 FPD 영역 직경 변화와 동일한 거동을 나타냄이 관찰된다. 이상의 결과를 미루어 보건대, 0.12~0.14 μm 크기의 미세한 LLS(또는 COP)가 인상속도 변화에 가장 민감하게 영향을 받으며, 이는 주로 인상 속도 변화에 따른 공공 과포화 영역 즉 COP 생성 가능 영역의 크기 변화에 기인하는 것으로 이해된다.

3-4. ΔO_i 와 BMD

결정이 성장된 이후 냉각되어 웨이퍼로 가공된 후 최초로 측정된 산소 농도를 초기(initial) 산소농도(O_i)라 한다. 일반적으로 Cz-Si에서는 산소가 과포화되어 있는 상태라 말할 수 있으며, 이를 특정한 조건에서 열처리하면 결정 내에 존재하는 산소의 일부가 산화물 형태로 석출되고 따라서 웨이퍼의 측정 산소 농도는 초기 농도 보다 낮은 값이 된다. 이 때의 초기 산소농도와 열처리 후 산소농도의 차이를 ΔO_i 라 한다.

ΔO_i 는 결정의 냉각 열이력에 따라 민감하게 영향을 받는다. ΔO_i 는 산소 석출 반응의 결과로 핵생성(nucleation) 및 성장 기구에 의하여 이루어지며, 실리콘에서의 경우 대략적으로 600~800°C의 온도에서는 핵생성이 촉진되고 1000°C 이상의 온도에서는 성장이 촉진 되는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 성장된 결정에 대한 냉각 과정 도중 특별한 온도에서의 체류시간이 변하게 되면 결정 내에 석출되는 산소 석출핵의 분포가 영향을 받고, 웨이퍼 가공 후의 특징의 열처리에 따라 산소 석출 거동이 크게 영향 받게 된다.

결정 성장 시 인상속도의 거시적 변화는 특정한 온도 대에 대한 체류시간을 바꾸게 되므로 산소 석출 핵 생성 거동에 영향을 주게 되어, 결과적으로 이후의 열처리에 의한 산소 석출거동에 영향을 줄 것으로 예상 할 수 있다.

Fig. 5(a)는 결정의 반경 방향과 성장 축 방향에 따른 ΔO_i 의 변화를 삼차원적 그래프로 나타낸 것이다. 800°C에서 4시간 그리고 1000°C에서 16시간 동안의 2단계 열처리 후, 반경 방향으로의 ΔO_i 의 변화를 관찰하여 보면, OSF-링 영역에서는 ΔO_i 가 매우 낮은 값을 보이는 반면 그것의 주변 영역에서는 반대로 높은 값을 나타내는 이상산소석출(anomalous oxygen precipitation: AOP)현상이 나타남을 알 수 있다.¹⁵⁾ Fig. 1에 나타낸 것처럼, 결정이 성장되면서 인상속도가 서서히 감소함에 따라 OSF-링의 위치가 결정 중심방향으로 조금씩 수축하게 됨과 동시에, OSF-링 주변 영역의 AOP 현상의 강도도 조금씩 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 인상속도가 조금 빠를수록 높은 과포화도가 유발되어 석출핵 생성 밀도가 높아지므로 특히 AOP 영역에서는 산소 석출이 훨씬 촉진될 수 있는 것에 기인한다고 할 수 있다. 그러나, 이러한 AOP 영역에 대한 거시적 인상속도 변동의 효과는 잘 구별되지 않는다.

Fig. 5(a)에서 보면 결정의 중심 영역에서는 결정의 위치에 따른 ΔO_i 변화가 그렇게 크지 않은 것으로 나타나지만, Fig. 5(b)에서처럼 결정 중심 영역에서의 ΔO_i 변화를 확대하여 관찰해 보면 인상속도 변동의 효과를 비교적 뚜렷하게 관찰 할 수 있다. Fig. 5(b)에서 ΔO_i 가 주변에 비하여 반경도의 수준으로 저하되는 "C" 영역은, 거시적 인상속도 변동이 도입될 때 성장 계면으로부터 약 150 mm 거리에 있는 약 1000°C 정도의 온도 대에서 냉각되는 부분에 해당된다. 결과적으로, 성장된 결정이 냉각되는 동안 인상속도 변동에 의하여 1000°C 부근을 빠르게 통과하게 되면 산소 석출 잠재핵이 안정한 성장을 이루지 못하게 억제되는 것으로 판단된다. 이는 Fig. 5(c)에 나타낸 것처럼 BMD 밀도 변화 관계로부터도 확인된다. 결정의 위치 약 400 mm 부근 영역에서는 주위에 비하여 BMD 생성 밀도가 한 차수(order) 낮은 수준으로 떨어짐을 확인할 수 있다. 이는 결정이 최초 냉각될 때 주변의 다른 영역보다 잠재핵이 충분

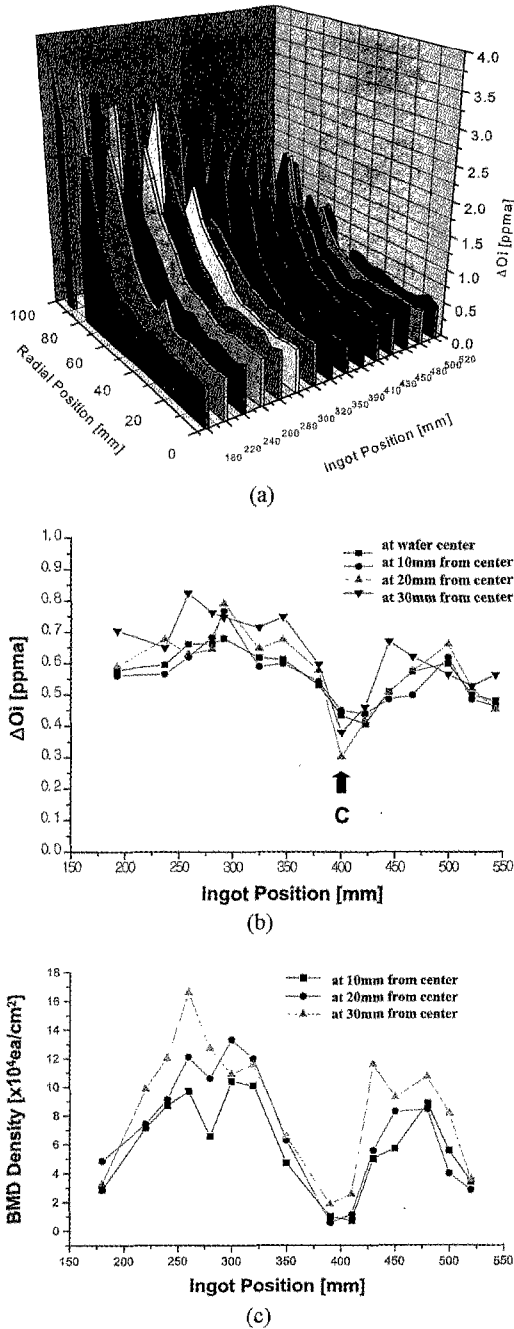


Fig. 5. (a) The radial and axial variation of ΔO_i , (b) the magnified axial variations of ΔO_i near the center region, and (c) the axial variations of the BMD density near the center region of the grown crystal in the Fig. 1. All these measurements were done after the 2-step heat treatment, at 800°C for 4 hours and at 1000°C for 16 hours in the nitrogen atmosphere.

하게 성장되지 못하였음을 의미한다.

4. 결 론

200 mm Cz-Si 결정 성장 시 큰 진폭과 파장을 갖는 인상속도 변동을 인위적으로 도입한 후, 이러한 거시적 인상속도 변동이 이미 정상적으로 성장된 결정 내의 성장 결함 형성 거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

OSF-링의 직경, FPD 발생 영역의 직경, 0.12~0.14 μm 의 미세한 LLS(또는 COP) 밀도 등은 전반적으로 평균적 인상속도 감소와 같은 경향을 나타낸다. 그러나, 거시적 인상속도 변동이 발생할 때, 약 1100°C 이상의 온도 영역에 있는, 성장 계면으로부터 성장된 결정의 약 100 mm 영역에서는 이러한 결함 형성 거동이 영향을 받게 된다. LLS(또는 COP) 밀도가 영향을 받는 것은 OSF-링의 직경이나 FPD 발생 영역의 직경이 변하는 것처럼 공공관련 결함 형성 영역이 변하는 것에 그 일차적 요인이 있다.

거시적 인상속도 변동이 도입될 때 성장 계면으로부터 약 150 mm 거리에 있는 약 1000°C 정도의 온도대에서 냉각되는 결정 영역에서는 ΔO_i 와 BMD 밀도가 영향을 받는다. 이 영역을 조금 빠르게 냉각되면 산소 석출핵 형성이 다소 억제되므로 BMD 밀도와 ΔO_i 가 낮아지는 경향을 나타낸다.

본 연구에서, 거시적 인상속도 변동 발생 시, 이미 성장된 결정 내에서도 성장 계면으로부터 약 150 mm까지의 영역에서는 주요 성장 결함 형성이 크게 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 물론 이러한 효과는 거시적 인상 속도 변동의 모양이나 크기에 따라 의존할 것으로 예상할 수 있지만, 본 연구 결과가 보여 주듯이 Cz-Si 결정 성장 시 거시적 인상 속도 변동이 발생한 경우 그 시점의 성장 계면 위치로부터 약 150 mm 구간 사이의 결정 결함 특성은 영향을 받으므로 품질관리 대상이 되어야 한다. 그러나 그 이전의 결정 영역은 인상 속도 변동의 효과가 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.

참고문헌

1) J. Ryuta, *Clean Tech.*, 5(5), 51 (1995).

- 2) Hourai, H., Nishikawa, H., Tanaka, T., Umeno, S., Asayama, E., Nomachi, T. and Kelly, G., in Silicon Materials Science and Technology: Semiconductor Silicon 1998, H. R. Huff, U. Gosele and H. Tsuya, Editors, PV 98-1, p. 453, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1998).
- 3) Park, J. G., Lee, G. S., Park, J. M., Chon, S. M. and Chung, H. K., in The SEMI Symposium Focused on Silicon Wafers, p.E-1, SEMI Silicon Wafer Symposium, SEMI (1998).
- 4) Sadamitsu, S., Umeno, S., Koike, Y., Hourai, M., Sumita, S. and Shimatsu, T., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, 3675 (1993).
- 5) Kato, M., Yoshida, T., Ikeda, Y. and Kitakawara, Y., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 5597 (1996).
- 6) Nishimura, M., Yoshino, S., Motorura, H., Shimura, S., Mchedidze, T. and Hikone, T., *J. Electrochem. Soc.*, **143**, L243 (1996).
- 7) Voronkov, V. V., Falster, R. and Holzer, J. C., in Crystalline Defects and Contamination: Their Impact and Control in Device Manufacturing II, B. O. Kolbesen, P. Stallhofer, C. Claeys and F. Tardiff, Editors, PV 97-22, p.3, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1997).
- 8) Dornberger, E. and W. von Ammon, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 1648 (1996).
- 9) Park, B. M., in Silicon Materials Science and Technology: Semiconductor Silicon 1998, H. R. Huff, U. Gosele, and H. Tsuya, Editors, PV 98-1, p. 515, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1998).
- 10) Kanda, T. and Ono, T., *Oyobuturi*, **66**(7), 707 (1997).
- 11) Voronkov, V. V., *J. Cryst. Growth*, **59**, 625 (1982).
- 12) Park, B. M., Seo, G. H. and Kim, G., *J. Cryst. Growth*, **203**, 67 (1999).
- 13) Harada, K., Furuya, H. and Kida, M., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 3366 (1997).
- 14) Borghesi, A., Pivac, B., Sassella, A. and Stella, A., *J. Appl. Phys.*, **77**, 4169 (1995).
- 15) Hwang, D. H., Lee, B. Y., Yoo, H. D. and Kwon, O. J., *J. Cryst. Growth*, **213**, 57 (1999).