

사파이어 웨이퍼의 기계-화학적 연마 가공특성에 관한 연구

신귀수*·황성원*·김근주*·서남섭*

(2003년 6월 9일 접수, 2003년 12월 19일 심사완료)

Chemo-Mechanical Polishing Process of Sapphire Wafers for GaN Semiconductor Thin Film Growth

Gwisu Shin, Sung Won Hwang, Keunjoo Kim and Nam Sup Suh

Key Words : Sapphire Wafer(사파이어웨이퍼), CMP Process(기계화학적 연마), DCXD(이중 X-선 결정회절), Surface Roughness(표면조도)

Abstract

The sapphire wafers for blue light emitting devices were manufactured by the implementation of the surface machining technology based on micro-tribology. This process has been performed by chemical and mechanical polishing process. The sapphire crystalline wafers were characterized by double crystal X-ray diffraction. The sample quality of sapphire crystalline wafer at surfaces has a full width at half maximum of 89 arcsec. The surfaces of sapphire wafer were mechanically affected by residual stress during the polishing process. The wave pattern of optical interference of sapphire wafer implies higher abrasion rate in the edge of the wafer than its center from the Newton's ring.

1. 서론

최근 고휘도 LED 기술개발의 급속한 발전과 시장의 급격한 팽창에 따라서 활용분야가 각종 디스플레이, 자동차, 가전제품, 신호등, 전광판, 조명등으로 광범위하게 넓어져 산업 전반에 사용되고 있으며, 또한 차세대 빛 기술로서의 중요성이 인식되어 지고 있다.

특히 청색 LED용 질화물계 반도체인 GaN처럼 에너지 밴드 갭이 넓은 반도체 소재는 박막을 성장시킬 경우에 높은 열에너지를 수반한다. 이러

한 청색 계통의 광소자용 결정을 성장하기에는 고온 성장동안 결정구조를 유지시킬 수 있는 재료를 기판으로 사용하여야 하며, 또한 기판과 박막과는 결정의 격자상수가 적절히 일치되어야만 두 물질 사이의 계면에서 변형 응력을 적게 받고 준동형의 격자간의 정합을 이룰 수 있다. 하지만 GaN 박막을 성장하는데 있어 적절한 기판이 없어 격자간의 부정합이 13.6%나 되는 사파이어 기판을 사용하고 있으며, 이러한 7:8의 격자간의 평균적인 배치로 이루어지는 기하학적 부정합에서 결정 성장이 가능하게 하기 위해서는 사파이어 기판 표면의 결정성 확보가 필요하다.⁽¹⁾ 이러한 표면광택도 확보 공정에 사용되는 평탄화 공정기술은 소자의 집적도를 향상시키고, 생산된 칩의 구조적인 신뢰를 실현하는 중요한 기술이 되고 있다. 또한 자기입자의 자력에 의한 극청정 연마 가공에 관한 연구가 수행되기도 하였다.⁽²⁾

본 연구에서는 기계-화학적 연마(chemo-mechanical polishing: CMP)⁽³⁻⁶⁾를 이용하여 사

* 전북대학교 기계공학과

† 책임저자, 전북대학교 기계공학과

E-mail:kimk@mail.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2317 FAX : (063)270-2315

파이어 기판을 미세 연마가공하고, 그 가공면의 가공정밀도를 측정하려 한다. 특히 가공특성을 파악하기 위해 X-선 C(0006) 회절 peak에 대한 이중 X-선 결정회절(double crystal X-ray diffraction: DCXD) 측정 및 원자힘 현미경(atomic force microscope: AFM)으로 가공특성을 정량화 하였다.

2. CMP 연마 메카니즘

반도체 소자용 웨이퍼의 표면을 경면화하는 여러 가지 방법들에 의해 제작된 사파이어 웨이퍼 기판은 연마공정이 마무리된 후에 결보기에는 거울 면의 광택이 나더라도 미세한 흠집(scratch)이 표면식각(etching) 공정을 수행하여 보면 검출되는 등, 사파이어 기판위에 증착되는 반도체 박막의 초기 상태의 결정성장에 영향을 미치게 된다. 반도체 단결정 박막이 형성되려면 원자층 형태의 성장에 있어서 사파이어 웨이퍼의 가공면이 원자층 수준의 평탄면을 필요로 하며 따라서 초정밀 평탄화 기술이 반도체 박막성장에서 중요하게 인식되고 있다. 기계-화학적 연마방식이 1980년대 말 IBM사를 통해 도입되었으며,⁽⁷⁾ CMP 연마 가공 원리는 Fig. 1과 같이 웨이퍼는 패드와 슬러리에 의해 연마되어지고 패드가 부착되어진 연마 테이블은 단순 회전운동만을 하고 헤드부는 회전운동과 요동운동을 동시에 실시하며 일정한 압력으로 가압을 하게 된다. 웨이퍼는 표면장력 또는 진공에 의해서 헤드부에 장착이 되어지고 헤드부의 자체하중과 가해지는 압력에 의해 웨이퍼 표면과 패드는 접촉하게 된다. 이 접촉면사이의 미세한 틈 사이로 가공액인 현탁 연마액(slurry)이 유동하게 되어 슬러리 내의 연마입자와 패드의 표면돌기에 의해 기계적인 제거작용이 이루어지며 슬러리 내의 화학성분에 의해서 화학적인 제거작용이 이루어진다. CMP공정에서는 패드와 웨이퍼간의 가압력에 의해 디바이스 돌출부의 상부에서부터 접촉이 이루어지고 이 부분에 압력이 집중되어 상대적으로 높은 표면제거 속도를 가져가게 되어 가공이 진행되어질수록 돌출부가 줄어들어 웨이퍼 전체표면에 걸쳐 균일한 평탄화가 진행되어진다.⁽⁸⁾

연질의 연마입자를 함유한 화학액을 첨가시킨 CMP 메카니즘을 간단히 요약하면,

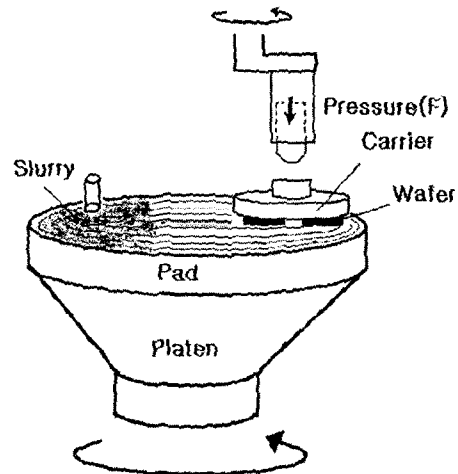


Fig. 1 Schematic model of CMP process

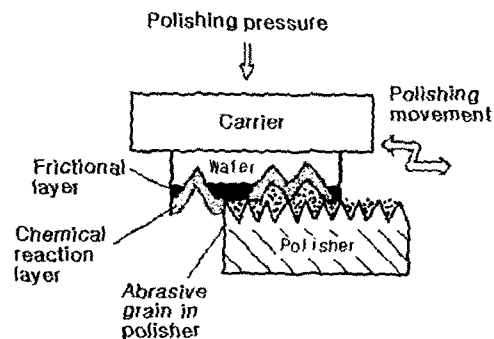


Fig. 2 Mechanism of CMP planarization

1. 슬러리와 공작물의 실제 접촉점에서 고상반응이 생기고 이 반응층이 마찰력으로 인해 탈락한다.
2. 가공분위기에 의해 급속히 반응하여 웨이퍼 표면에 산화층 또는 수화층이 형성되고 이 생성층 위에서 1과 마찬가지로 고상반응과 반응층 제거가 이루어진다.
3. 연질의 연마입자가 촉매로 작용을 하여 웨이퍼 표면의 산화를 촉진하고 이 산화층이 연마입자의 마멸현상에 의해 제거된다.⁽⁹⁾

Fig. 2와 같이 연마패드와 사파이어 웨이퍼 사이에 연마액을 공급하여 압력을 가한 상태에서, 서로 상대운동으로 연마 가공되어지는 메카니즘을 갖는다. 이러한 연마과정은 Preston의 식으로 표현되어진다.⁽¹⁰⁾

$$M(\mu\text{m}/\text{min}) = \eta \cdot p \cdot v \quad (1)$$

여기서, M 은 표면이 제거되는 질삭속도, p 는 접촉면의 가공압력이고 v 는 웨이퍼와 패드의 상대 속도이다. η 는 가공 조건으로 정해지는 상수로 Preston계수이다. 화학적 작용이 복합된 기계-화학적 연마에서는 Preston계수 η 에 의해서 표면 제거 속도가 크게 변동되어진다.^(11,12)

패드의 철부에는 높은 가공 압력이 걸려 상대적으로 높은 속도로 제거된다. 철부 부위가 가공되어 가면서 접촉면적은 늘어나게 되어 실질적으로는 가공 압력이 감소하여 가공 속도도 감소하여 간다. 그렇지만 거시적으로는 웨이퍼 표면 전체에서의 가공 속도는 일정상태가 된다.

3. 실험방법

Fig. 3은 AFM측정기 해상도에 따른 표면 거칠기를 측정하는 개략도이다. 주어진 거친 표면에 대해 해상도 τ 를 가진 측정기는 거리 τ 에 의해 분리된 표면 점들의 높이를 측정할 수 있는 것이다. τ 가 감소되면, 표면의 새로운 위치가 나타난다. 표면 거칠기의 멀티스케일 때문에, τ 값의 감소는 동일 표면도 다르게 보인다. τ 가 감소될 때, 두 이웃하는 점을 연결한 직선이 Fig. 3에서 정성적으로 관찰된 평균치보다 더 가파르게 되어진다.

폴리싱하여 경면 형상을 갖는 웨이퍼표면의 결정성을 조사하기 위해 X-선 결정회절(X-ray diffraction: XRD) 실험을 수행하면 Fig. 4와 같은 회절각도에 따른 결정면 방향의 회절 피크점이 존재하게 된다. X-선 빔을 한번 결정면(Ge)을 통하여 분리시킨 다음 시료표면에 조사하는 회절 실험(single crystal XRD)에서는 사파이어 기판이 (0006)면과 (00012)면에서 회절이 일어남을 알 수 있으며, 웨이퍼 표면은 C면(0001)으로 41.73°로 일치함을 알 수 있으며 이에 수직인 flat cut도 a면(1120)으로 일치함을 확인할 수 있다.

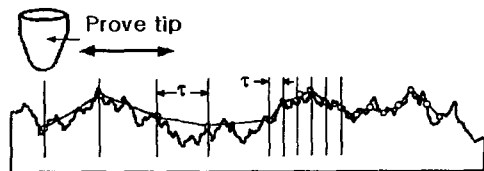


Fig. 3 Schematic diagram of AFM measurement

폴리싱된 사파이어 웨이퍼 표면의 잔류 응력(residual stress)에 의한 표면결함(surface defect) 및 변위량을 알기 위해서 국소적인 C(0006)회절 피크점 부근에서 회절세기를 정밀 측정하기 위해 X-선 빔을 더욱 정렬시킬 필요가 있으며, X-선을 2번 결정면(Ge)에 회절시켜 빔을 정렬시킨 다음, 시료에 이중결정 X-선 회절(DCXD) 실험을 수행하였다.

2인치 웨이퍼를 정반에 부착하여 연마를 수행하면 Fig. 5와 같은 기계적인 표면가공에 의해 손상된 표면층을 개략적으로 나타낼 수 있다. 기판의 완전 결정층 위로 미세한 결정립의 다결정층에 의해 결정구조가 흩어진 손상층에는 표면가공으로 생긴 크랙층 및 잔류 응력에 의한 스트레층이 존재하며 가공 손상층의 두께는 연마할 때의 연마제 크기, 연마속도, 연마시간 및 압력조건에 의해 달라진다.

표면 평탄도(waviness) 측정은 광학 윈도우를 사용하여 빛의 간섭현상을 응용한 간섭계(interferometry)로 측정한다. 광학 윈도우는 매우 정밀 가공된 편평한 유리판으로 용해 석영유리나 그 밖의 광학유리들을 사용한다.

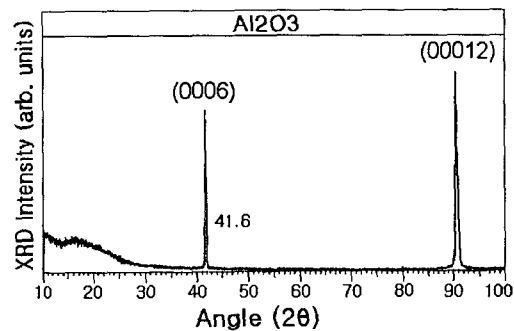


Fig. 4 The XRD spectrum of sapphire wafer with a C(0001) plane

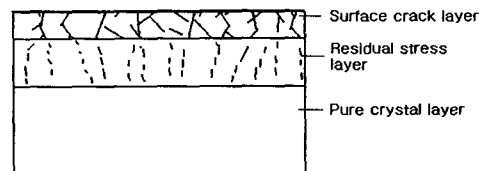


Fig. 5 Schematic diagram of surface damaged layers of sapphire wafer

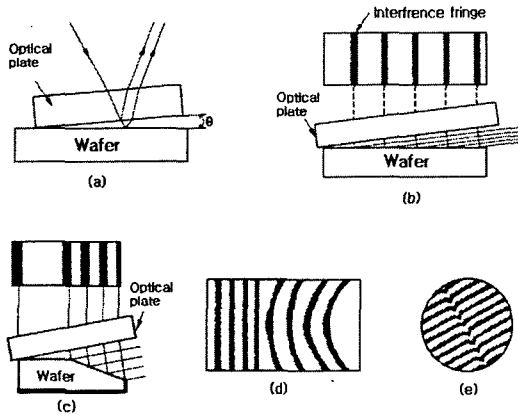


Fig. 6 Schematic diagrams for various interference patterns of surface states

Fig. 6에서처럼 대상물 표면에 광학 윈도우를 놓고, 단색광원에서 발생된 단일파장의 광선을 임의의 각도로 표면에 입사시킨다. 입사된 광선이 반사될 때는 두 개의 광선으로 나뉘게 되어 눈으로 식별이 가능한 밝고, 어두운 띠 모양의 간섭무늬가 생긴다. 이렇게 나타나는 줄무늬의 수는 대상물의 표면이 완전한 평면일 경우 빛의 간섭이 일어나지 않으므로 간섭무늬도 생기지 않는다. 하지만, Fig. 6(a)에서처럼 경사각이 크면 간섭무늬 등고선간 간격이 조밀하고 경사가 완만하면 등고선간 간격이 넓어진다. Fig. 6(d)에서처럼 측정 표면이 편평하지 않으면 휘어진 간섭무늬가 생긴다. Fig 6(e)의 간섭법은 가공면의 가공무늬나 흠집을 검사하는데 이용된다. 또한 간섭무늬를 확인하는데 보다 나은 가시도를 위해 현미경을 통해 관찰되기도 한다.^(13,14)

4. 결과 및 고찰

표면광택의 폴리싱(polishing)공정은 기계적으로 래핑된 표면의 조도를 원자적으로 평탄하게 하기 위한 경우로 Fig. 7과 같이 주석 정반이나 폴리우레탄 정반 위에서 표면흡착성이 우수한 수용액(surfactant)을 이용하여 화학반응을 고려한 기계-화학적 연마를 수행한다. 현탁 수용액(slurry)속에 0.007 μ m 크기의 silica(SiO₂) 콜로이

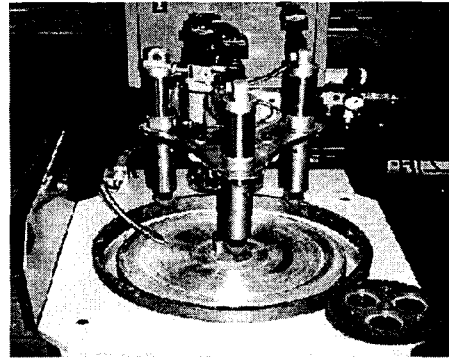


Fig. 7 CMP machine for sapphire wafer polishing

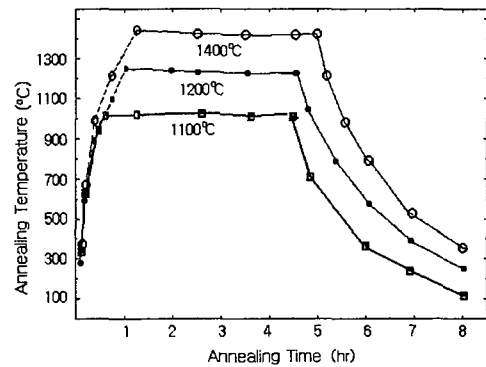


Fig. 8 Annealing temperature gradient of sapphire wafer

드(colloid) 상태의 미립연마제(abrasive particle) 2-10wt%와 증류수(de-ionized water), pH stabilizer, 계면활성용 수용액을 넣어 가공하게 된다. 기계-화학적 연마가공에서는 음이온 전위를 갖는 웨이퍼 면에서 양이온 활성제를 첨가하면 해리된 활성제 양이온이 고체면에 흡착되기 시작하여 흡착층을 형성하고 표면전위가 감소되면서 표면전위의 부호가 역전되는 현상을 갖는다. 따라서 폴리싱 공정에서 slurry 용액 pH를 안정화시켜, 연마입자가 갖는 표면 포텐셜 (Zeta potential:ζ)의 음이온 장벽의 크기를 극대화함으로써 전기적 반발력에 의해 입자들의 분산을 촉진시킬 수 있다. 실리카 콜로이드 경우 NaOH, KOH, NH₄OH, NaOCl 등의 염기성의 물질이 분산을 촉진하며 주로 사용된다.^(15,16)

불순물의 활성화 및 확산이나 손상된 결정 격자나 비정질화된 부위의 재 결정화를 위해서 열처리 공정을 수행하였다. 안정적인 고온을 형성

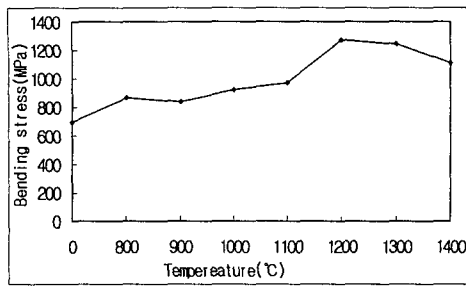


Fig. 9 Bending stress after thermal annealing

하고 열처리 온도특성을 확인하기 위해 1000°C, 1200°C, 1400°C에서 1시간 유지시키도록 설정하여 온도의 분포를 확인하였다. Fig. 8은 열처리로의 heating 시간에 따른 온도 구배 곡선으로 예열시간이 20~30분이 소요되며 가열 후 온도하강 곡선이 지수적으로 감소하는 양상을 보이고 있다.

Fig. 9는 사파이어 웨이퍼의 폴리싱 후 열처리 온도에 따른 굽힘응력의 변화를 나타내었다.

사파이어 웨이퍼는 불활성가스 환경하에서 2시간동안 열처리하면 α-AL2O3성상이 β-AL2O3성상으로 재결정화하면서 기계적인 강도가 증가하며, 1200°C부근의 온도에서 재결정이 이루어진다. 열처리전의 굽힘응력보다 열처리후에 굽힘응력이 60% 증가하였다. 하지만 그 이상의 온도에서는 강도가 증가되지 않으며 열처리 시간을 증가시켜도 커다란 변화를 보이지 않았다. 기계적인 강도의 변화는 표면층의 손상된 결정격자의 재결정화에 의해서 표면의 미세 스크래치된 부위에서의 응력집중 현상을 완화 및 제거함으로써 가능하다. 열처리한 후 다시 폴리싱을 수행하여 기계적인 강도를 확인하면 열처리전의 시료와 동일한 강도를 보였다. 따라서 열처리공정을 최종적인 폴리싱 공정이 수행된 후 수행되어야 바람직하다.

Fig. 10은 연마 및 폴리싱 공정 후 세정한 표면의 시료에서의 조도에 따른 회절된 X-선의 세기를 나타내는 스펙트럼으로 반치폭(FWHM)은 250 arcsec를 나타낸다. 폴리싱을 수행한 시료는 표면조도가 거칠수록 반치폭이 증가하며 250~350 arcsec 영역의 비교적 큰 수치를 나타낸다. 즉 조도가 클수록 표면의 접촉 표면적이 커지고 회절각의 산포가 증가됨을 알 수 있다. 조도에 따른 미세 결정간의 깨진 금(crack)이나 전위

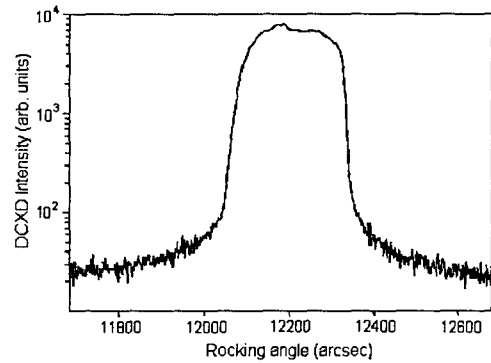


Fig. 10 DCXD spectrum of Al2O3 C(0006) after polishing

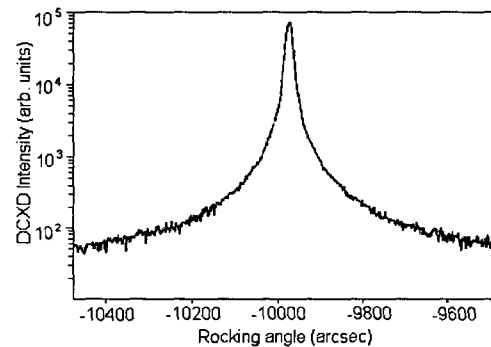


Fig. 11 DCXD spectrum of Al2O3 C(0006) after heat treatment

(dislocation)밀도가 매우 높음을 의미한다. 따라서 표면 전위 및 결함을 감소시키기 위하여 열처리를 수행한 결과가 Fig. 11과 같이 반치폭이 16 arcsec로 매우 작아짐을 나타내고 있다.

Table 1은 여러 사파이어 시료에 대해 폴리싱과 열처리를 순차적으로 수행한 경우 반치폭이 공정마다 줄어드는 추세에 대한 정량적인 데이터를 나타낸다. 폴리싱 공정 후에 반치폭은 대략적으로 250-350 arcsec를 갖으며, 열처리를 통하여 반치폭이 현저하게 줄어들음을 알 수 있다.

사파이어 기판의 표면 조도를 원자힘 현미경(AFM)으로 측정하였으며, 웨이퍼의 한점을 선택하여 스캔면적이 1×1μm²인 국소적 미세표면의 거칠기를 확인하였다. Fig. 12는 사파이어 웨이퍼 표면의 AFM 이미지를 나타낸 것으로 최고봉과 최저곡 사이의 최대조도 차이가 14.5Å이며 중간조도는 7.5Å이고 평균조도는 1.0Å을 나타내고 있다.

Table 1 FWHMs of DCXD for the surface polishing and annealing processes

sample	FWHM (arcsec)	
	polishing	annealing 1200°C/4h
F10	335.5	71.3
F5	275.1	67.3
G5	302.7	21.6
G2	294.0	17.3
G8	271.2	15.8
A1	268.6	13.5

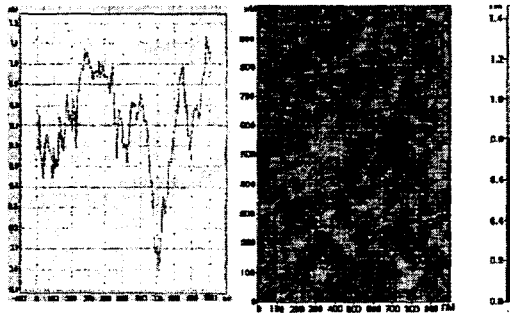


Fig. 12 AFM image of the surface of sapphire wafer

Table 2는 표면처리 공정에 따른 결정회절의 반치폭과 AFM으로 관측한 표면조도의 상관 관계를 나타내고 있다. 표면조도는 폴리싱공정 수행후 측정된 결과 대체로 양호한 실효 조도를 나타내고 있다.

사파이어 기판 표면 평탄도 평가는 Fig. 13과 같이 웨이퍼 위에 광학원도우를 놓은 상태에서 555nm의 단색광을 입사시키면 뉴턴링의 간섭무늬 상이 나타난다. 웨이퍼가 가공으로 인해 웨이퍼의 중심부가 불룩하게 곡률이 존재하며 가장자리부위가 중심부보다는 낮아지면서 마모율이 크게 됨을 알 수 있다. 또한 줄 간격이 동심원형으로 부분적인 흠집이나 요철부위가 없이 연마되어 짐을 알 수 있다.

X선 평가와 표면 전위밀도 측정은 C면(0006)에서의 회절 스펙트럼으로부터 사파이어 웨이퍼를 정량적으로 평가 할 수 있으며, 결정내의 전위결함이 이 반치폭에 비례하고 전위밀도는 다음 식으로 표현된다.⁽¹⁷⁾

$$\rho_D = \frac{\Delta^2}{9b^2} \quad (2)$$

Table 2 The relationship between FWHM of DCXD and the surface roughness estimated in AFM

Sample	DCXD		AFM			
	Peak position (deg)	FWHM (arcsec)	R _{p-v} (Å)	R _{rms} (Å)	R _{ave} (Å)	
polishing	HB1	20.5	247	23.8	2.8	1.6
	HB2	20.9	257	33.9	2.9	2.1
annealing	HB3	19.8	15.5	98.1	6.5	3.4
	HB7	20.3	11.2	166	3.2	2.3
	HB8	20.6	19.8	79.8	8.6	6.2

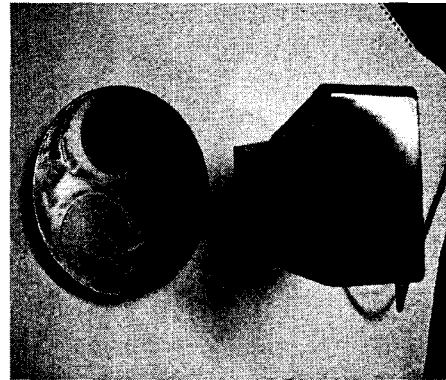


Fig. 13 The optical interference pattern of sapphire wafer

여기서, $\rho_D(\text{cm}^{-2})$ 는 전위밀도이고 Δ 는 반치폭 (radian), $b(a[1\bar{1}20]=4.765 \text{ \AA})$ 는 선단형 전위 (edge-type dislocation)의 Burgers 벡터이다. 박막내의 전위밀도는 각각 $0.59 \times 10^6/\text{cm}^2$ 을 나타낸다. 이는 표면 시각 관찰에 의한 결과보다 다소 적은 전위밀도를 보이며, 이러한 전위밀도의 차이는 기계적인 연마공정에 의한 결함의 진행에 기인될 수 있음을 의미한다.

5. 결론

청색광소자용 기판으로 사용하기 위한 사파이어 웨이퍼를 기계-화학적 연마 가공하여 사파이어 웨이퍼 가공 최적 조건을 연구하였다. 웨이퍼 표면의 기계적인 연마로 인해 손상된 격자를 복구(curing)하기 위해서는 높은 활성화 에너지와 불순물의 확산에너지보다도 손상된 격자의 치유에 필요한 활성화에너지가 크기 때문에 고온에서

의 열처리가 필요하다.

기계-화학적 연마 공정을 수행한 웨이퍼 표면으로부터 이중결정 X-선 결정회절에 의한 반치폭은 250~350 arcsec 영역의 비교적 큰 수치를 갖으며, 표면이 기계적인 스트레스에 의해 결정성이 손상됨을 알 수 있었다. 따라서 열처리를 수행하여 결함을 최소화함으로써 반치폭이 현저하게 감소를 알 수 있었다.

사파이어 웨이퍼의 평탄도는 뉴턴링 간섭상의 존재로 웨이퍼의 자장자리가 중심부보다 마모율이 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 캐리어에 웨이퍼를 부착할 경우 부착 방법을 고려해야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2002년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Kim, K. and Koh, J. C., 2000, "GaN epitaxial growths on chemically and mechanically polished sapphire wafers grown by Bridgeman method," *Journal of the Korea Association of Crystal Growth*, Vol. 10, No. 5, p. 350.
- (2) Kim, J. D. and Heo, G. W., 2000, "Polishing of ultra-clean internal surface using magnetic force," *Trans. of the KSME A*, Vol. 24, No. 11, pp. 2786~2795.
- (3) Singger, P. H., 1992(Mar.), *Semiconductor International*, p. 44.
- (4) O'mara, W. C., 1994(Jul.), *Semiconductor International*, p. 140.
- (5) Sung-Hwan Cho, Hyoung-Jae Kim, Ho-Youn Kim, Heon-Deok Seo, Kyoung-Jun Kim and Hae-Do Jeong, 2001, "Study on the Improvement of the Slurry Dispersibility in CMP," *Trans. of the KSME A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1535~1540.
- (6) Sung-Hwan Cho, Hyoung-Jae Kim, Kyoung-Jun Kim and Hae-Do Jeong, 2002, "The Study on the CMP of Transparent Conductive ITO Thin Films for the Organic Electro-Luminescence Display," *Trans. of the KSME A*, Vol. 26, No. 5, pp. 975~985.
- (7) Pennington, S. and Luce, S., 1992, *VMIC Conference*, pp. 168~172.
- (8) Jung, H. D., 1996, "Ultra Precision Machining Technology for ULSI Chip Fabrication," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 36 No. 3, pp. 221~230.
- (9) Jung, H. I., 2000 "Effects of Film Type on CMP Characteristics," A master's thesis of Hanyang University.
- (10) Preston, F. W., 1927, "The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines," *Journal Society of Glass Tech.*, pp. 214~256.
- (11) Cook, L. M., 1990, *J. Non-cryst. solids*, Vol. 120, p. 152.
- (12) Lin, C.-W., Dai, B.-T. and Yeb, C.-F., 1995, *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 142, No. 9, p. 3098.
- (13) Sivaram, S., et al., 1992, Proc. of Workshop on ULSI Metallization, MRS.
- (14) Miller, J. F., Lai W. Y.-C. and Hoffman, M., 1995, *Proc. IEEE VLSI Multilevel interconnection conf.* p. 476.
- (15) Papoulis, A., 1965, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes," McGraw-Hill, New York.
- (16) Gutsche, H. W. and Moody, J. W., 1978, "Polishing of sapphire with colloidal silica," *J. Electrochem. Soc.* Vol. 125, p. 136.
- (17) Kim, K. and Park, C. B., 1998, "The Effect of Geometrical Misfit Dislocation on Formation of Microstructure and Photoluminescence of Wurtzite GaN/Al₂O₃(0001) Films Grown by Low Pressure Metal-Organic Chemical Vapor Deposition," *Thin Solid Films*, Vol. 330, p. 139.