

## 단결정 실리콘의 기계적 손상에 대한 열처리 효과

정상훈 · 정성민 · 오한석\* · 이홍림<sup>†</sup>

연세대학교 세라믹공학과

\*주새빛 생산기술연구소

(2003년 4월 19일 접수; 2003년 6월 30일 승인)

### Thermal Annealing Effect on the Machining Damage for the Single Crystalline Silicon

Sang-Hun Jeung, Seong-Min Jeong, Han-Seog Oh,\* and Hong-Lim Lee<sup>†</sup>

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*Sebit Co., Chonan Valley, Chungnam Technopark, Chungnam 330-816, Korea

(Received April 19, 2003; Accepted June 30, 2003)

#### 초 록

(111) 및 (100) 단결정 실리콘 웨이퍼에 대하여 #140 mesh와 #600 mesh의 연삭숫돌을 사용하여 연삭가공을 행하고 가공에 의한 표면품질의 변화를 관찰하였다. 이를 위하여 Atomic Force Microscope (AFM)을 사용하여 미세거칠기를 분석하고 라만 분광법(Raman spectroscopy)을 통하여 결정구조, 상변화 및 잔류응력을 분석하였다. 그 결과 연삭가공 후에 (111) 면에서 미세거칠기가 더 크게 나타났으며 실리콘이 다이아몬드구조의 Si-I에서 Si-III(body centered tetragonal) 및 Si-XII(rhombohedral)로 전이하는 현상을 라만스펙트럼 분석을 통해 확인하였다. 또한 연삭가공에 의하여 패인 구덩이에서는 일반적인 가공표면과 다른 라만스펙트럼이 관찰되어, 표면에 인가된 잔류응력이 새로운 표면생성으로 해소되었음을 알 수 있었다. 또한 열처리에 의한 재료의 표면품질개선효과를 분석하기 위하여 대기 중에서 열처리를 시행한 결과 열처리 는 잔류응력의 해소와 상전이의 회복에 효과적인 것으로 나타났다.

#### ABSTRACT

#140 mesh and #600 mesh wheels were adopted to grind (111) and (100) oriented single crystalline silicon wafer and the grinding induced change of the surface integrity was investigated. For this purpose, microroughness, residual stress and phase transformation were analyzed for the ground surface. Microroughness was analyzed using AFM (Atomic Force Microscope) and crystal structure was analyzed using micro-Raman spectroscopy. The residual stress and phase transformation were also analyzed after thermal annealing in the air. As a result, microroughness of (111) wafer was larger than that of (100) wafer after grinding. It was observed using Raman spectrum that the silicon was transformed from diamond cubic Si-I to Si-III(body centered tetragonal) or Si-XII(rhombohedral). Residual stress relaxation was also shown in cavities which were produced after grinding. The thermal annealing was effective for the recovery of the silicon phase to the original phase and the residual stress relaxation.

**Key words :** Silicon, Microroughness, Micro-Raman spectroscopy, Residual stress, Phase transformation

#### 1. 서 론

반도체소자제조에 가장 널리 사용되는 실리콘은 현대의 전자 및 정보통신 관련산업에서 필수 불가결한 소재로서, 소자제조에 사용되는 웨이퍼 형태로 가공하기 위하여 초크랄스키(Czochralski)법으로 단결정 성장시킨 잉곳(Ingot)을 sawing, lapping, etching, polishing 등의 가공공정을 거치게 된다. 최종 웨이퍼 제품에서는 소자 제조공

정상이나 공정후의 제품의 열화를 야기시킬 수 있는 표면의 결함이 배제되어야 하므로, 무결함(defect free)의 웨이퍼를 제조할 수 있는 웨이퍼 가공공정의 최적화가 요구되고 있다. 최근의 반도체소자의 집적화로 인한 회로선폭의 감소는 웨이퍼제품의 더 높은 무결함수준을 요구하고 있으며, 또한 최근의 300 mm 웨이퍼의 등장은 기존의 웨이퍼 제조공정을 전면적으로 개선시킬 것을 요구하고 있다. 즉, 광역 평탄화(global planarization)나 나노토포그래피(nano topography) 등의 개념의 등장으로 새로운 제조공정의 도입이 요구된다.

이에 대하여 새로이 도입되고 있는 신공정으로서 현재 가장 각광받고 있는 것은 정밀연삭(fine grinding)공정으로

<sup>†</sup>Corresponding author : Hong-Lim Lee

E-mail : htm@yonsei.ac.kr

Tel : +82-2-2123-2849 Fax : +82-2-365-5883

실리콘 제조공정에 도입되기 위하여 이 공정에 대한 연구가 최근 세계적으로 활발하다. 정밀연삭은 일반적으로 2000 mesh(입도 3~6 μm) 이상의 다이아몬드 스톨을 사용하며, 연삭가공 후 표면에 결함이 없고 평균표면거칠기 (R<sub>a</sub>)가 30 nm 미만인 공정을 의미한다.<sup>1)</sup> 정밀연삭공정에서 주요 공정조건은 연마입자 마모율, 마모된 연마입자 제거, 연삭스톨의 종류, 연삭스톨의 모양 등을 들 수 있으며, 이러한 공정조건을 어떻게 최적화하는가에 따라서 최종 웨이퍼 제품의 품질이 좌우된다.

한편, 실리콘은 세라믹스로서 취성파괴를 일으키는 물질이며 결정면에 따라 물리적인 특성이 다르게 나타난다. 따라서 실리콘의 가공에 있어 그 결정면이 또한 가공변수가 될 수 있다. 취성재료에 대한 무결합의 가공방법은 연성영역가공(ductile regime machining)이라고 하며, 초기에는 주로 비정질유리를 이용하여 연구가 이루어졌다. 최근에는 이 가공방법이 실리콘 등의 결정질 세라믹 재료에도 도입되어, 실리콘 웨이퍼의 결정면과 가공방향에 대한 연구가 이루어진 바 있다. Iizuka 등은 (111) 실리콘 웨이퍼에 대하여 여러 가지 방향으로 스크래치실험을 행하고 결정방향과 기계가공방향과의 관계에 따른 전위생성을 연구하였다.<sup>2)</sup> Scattergood 등과 Shibata 등은 각각 (111), (100) 실리콘 웨이퍼에 대하여 선삭(turning) 공정을 행하고 가공후의 실리콘 웨이퍼의 가공손상을 관찰하였다.<sup>3,4)</sup> 이러한 결정학적인 가공연구에서는 가공된 표면 및 단면과 chip에 대하여 주로 광학현미경, 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope), 투과전자현미경(TEM: Transmission Electron Microscope), (AFM: Atomic Force Microscope) 등을 이용한 연구가 활발하다.<sup>5,6)</sup>

이외에도 라만 분광법을 통하여 실리콘의 압입에 의한 응력분포와 평면응력에서 실리콘 웨이퍼의 잔류응력의 정량화가 이루어졌으며, 기계가공 후의 반도체의 내부응력에 대하여도 연구된 바 있다.<sup>7)</sup> 단결정 실리콘에 대한 연삭가공 후의 응력분포에 의한 상변화 및 기계적 손상거동, 잔류응력분석에 대해서도 라만분광법을 이용한 연구가 진행되고 있다.<sup>8)</sup>

본 연구에서는 반도체 제조공정에서 가장 널리 쓰이는 실리콘을 이용하여 정밀연삭을 행하여 미세거칠기(micro roughness)를 관찰하고 가공시 표면에 인가되는 응력으로 인한 상변화를 분석하였다. 또한, (111), (100) 실리콘 웨이퍼를 동일한 가공조건으로 미세거칠기를 관찰하고 가공시 표면에 인가되는 응력으로 인한 상변화를 라만분광법을 이용하여 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 미세거칠기와 Fourier 변환

광학적으로 얻은 이미지에 대한 미세거칠기를 나타내

는 인자로 R<sub>a</sub>, R<sub>ms</sub>, R<sub>p-v</sub>와 같은 값이 일반적으로 사용되어 왔다. 그러나 어떤 영역의 범위를 주사(scanning)하는냐에 따라 미세거칠기의 값은 다르게 나타난다. 즉 작은 범위를 주사할 때보다는 큰 범위를 주사할 때 거칠기 값이 크게 나타난다. 따라서 이미지에서 얻은 표면에 대한 미세거칠기를 정량화하기 어려우며 서로 다른 두 시편을 비교하는데 어려운 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이런 문제점을 해결하기 위하여 PSD (Power Spectral Density)를 사용하여 서로 다른 시편간의 미세거칠기를 비교 분석하였다. PSD는 구현된 이미지의 전 범위에 대한 미세거칠기 값을 나타내며 이 값을 얻기 위해서는 Fast Fourier 변환 (FFT: Fast Fourier Transformation)을 사용한다.

FFT는 식(1)과 같이 정의된다.

$$H(f) = \frac{1}{L} \int h(x) \exp(2\pi ifx) dx \quad (1)$$

여기서 L은 scan length (μm), h(x)는 line profile (Å), f는 x방향의 spatial frequency이다. 또한 Fourier 급수(Fourier series)를 이용하여 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$H(f) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^N h_n \exp(2\pi i \Delta L f n) (\Delta L) \quad (2)$$

여기서 h<sub>n</sub>은 n번째 위치에서의 높이이다.

PSD는 Fourier transform을 이용하여 식(3)과 같이 정의할 수 있으며 AFM을

$$PSD(f) = \frac{1}{L} \left| \sum_{n=1}^N h_n \exp(2\pi i \Delta L f n) (\Delta L) \right|^2 \quad (3)$$

사용하여 얻은 2차원 이미지를 1차원인 x, y 방향의 각 라인에 대해 Fourier transform을 적용하여 얻은 표면거칠기를 나타낸다.

Fig. 1에서는 AFM를 이용하여 얻은 표면거칠기를 나타내는 이미지와 위에서 언급한 FFT를 이용한 PSD curve를 나타내었다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이, PSD curve 분석을 통하여 여러 측정범위에서의 시편의 표면거칠기를 분석할 수 있다.

## 3. 실험방법

본 연구에서는 초크랄스키법으로 성장시킨 6 inch (111) 실리콘 웨이퍼(LG siltron, Korea)를 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 한 변이 1 cm인 정삼각형 시편으로 가공하였다. 이 시편에 대하여 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 정밀가공 연삭기(precision grinding machine, Samsung & Clover, Korea)를 사용하여 Table 1에서 나타난 바와 같은 가공조건으로 정밀연삭 가공실험을 행하였다. 이때, 연삭입자크

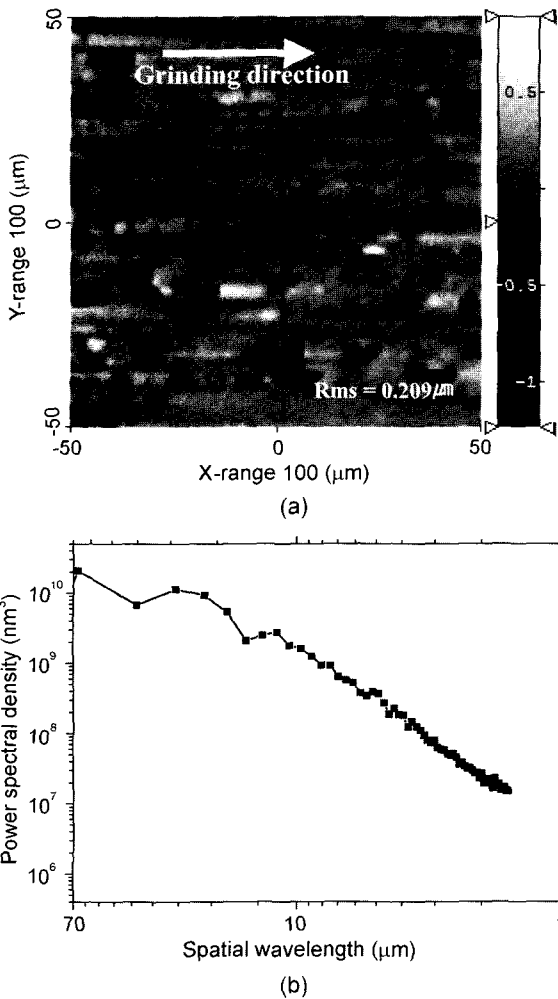


Fig. 1. Roughness analysis using AFM and FFT. (a) Surface morphology image obtained by AFM and (b) PSD curve calculated from surface morphology image using FFT.

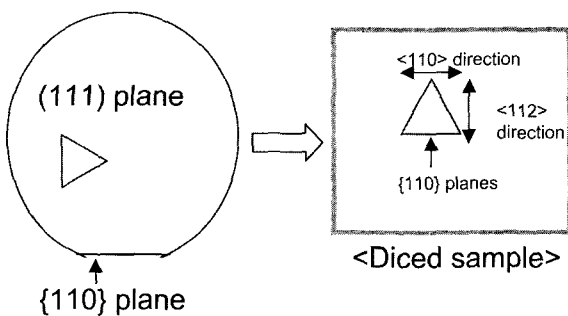


Fig. 2. Crystallographic orientations for (111) silicon wafer samples.

기의 영향을 분석하기 위하여 각각 #140 mesh(입도 : 120 μm)와 #600 mesh(입도 : 28 μm)의 연삭숫돌(resin bonded grinding wheel, Ewha Diamond, Korea)을 사용하여 연삭가공을 실시하였으며, (100) 웨이퍼와의 비교실험을 위하여 1×1 cm 가공된 (100) 웨이퍼를 사용하였다. 또한 열처리를 통하여 시편에 가해진 응력의 해소현상과 고압상의 변화를 관찰하기 위해 750°C에서 10분 열처리를 시행하였다.

가공후의 시편의 표면거칠기는 AFM (Atomic Force Microscope; autoprobe CP, PSI, USA)을 사용하여 분석하였다. AFM 분석 시에는 contact mode를 사용하였다. 이때 scanning range는 100×100 μm, scanning rate는 0.8 Hz였다.

가공손상에 의한 잔류응력분석 및 결정구조분석을 위하여 마이크로 라만 분광기(micro Raman spectroscopy: Jobin Yvon Spex T64000, France)를 사용하였다. 라만 분광법의 레이저소스는 514.532 nm 파장의 Ar 이온 레이저를 사용하였고, 분해능(resolution)은 1 μm였다.

표면거칠기를 표현하기 위해서는 그 측정범위에 대한 언급이 매우 중요하므로 본 연구에서는 FFT (Fast Fourier Transform)를 적용한 PSD (Power Spectral Density) curve를 사용하여 각 가공조건별로 측정범위에 따른 표면거칠기를 비교하였다. 이를 위하여 AFM으로 얻은 표면이미지를 image processor인 SPI(image metrology ApS, Denmark)를 이용하여 FFT를 수행하고 이를 통하여 각각 실험조건에 대한 PSD curve를 구하고 이를 서로 비교 고찰하였다.

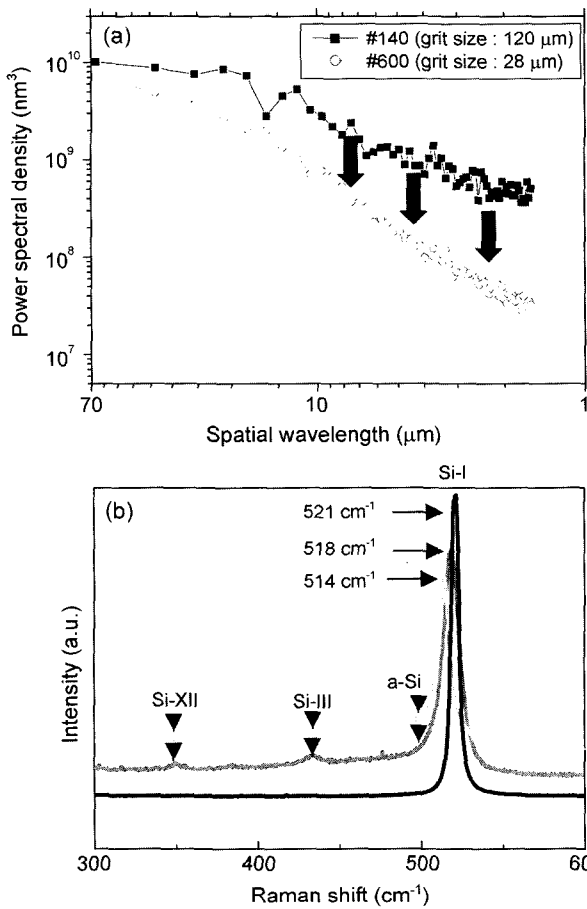
4. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)에서 PSD curve를 이용하여 (111) 실리콘 웨이퍼 시편의 연삭숫돌 입자크기의 미세거칠기에 대한 영향을 나타내었다. Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이 #140 mesh의 거친 연삭숫돌을 사용한 경우가 #600 mesh의 좀더 고운 연삭숫돌을 사용한 경우보다 전 측정범위에서 더 거친 가공표면을 가짐을 알 수 있었다. 즉, 연삭숫돌의 입자크기와 가공표면의 거칠기는 서로 상관관계에 있는 것으로 나타났다.

한편, 라만분광분석은 재료의 결정구조분석 및 잔류응력분석에 사용되어질 수 있다. 일반적으로 표준상태에서 다이아몬드구조(Si-I)를 갖는 실리콘단결정은 일정수준의 압력이 인가될 때 체심정방구조(body centered tetragonal)

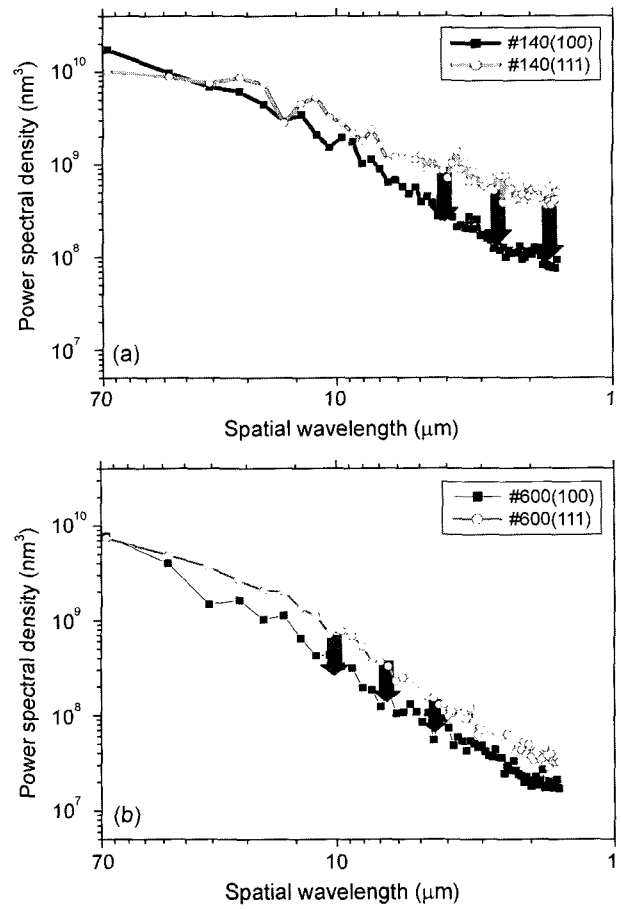
Table 1. The Matrix of Design of Experiment

	Wheel rotational speed (RPM)	Grinding removal (μm)	Grinding	Feed rate (μm/sec)	Coolant	Thermal annealing
#140	300	100	(111) (100)	0.5	Water	750°C 10 min in air
#600	300	100	(111) (100)	0.5	Water	750°C 10 min in air



**Fig. 3.** Grinding wheel grit size effect on the surface integrity for the (111) wafer. (a) Surface roughness analyzed with PSD curve and (b) Crystalline structure analyzed with Raman Microscopy - (1) Bare wafer, (2) #140 mesh ground wafer, and (3) #600 mesh ground wafer.

의 금속성의 특징을 갖는 Si-II로 상전이하며, 이 Si-II는 압력 제거시 다시 체심입방구조(body centered cubic)의 Si-III 또는 능면구조(rhombohedral)의 Si-XII로 전이하는 일련의 상변태거동을 나타내는데, 라만분광법은 이러한 일련의 실리콘 상전이의 분석도구로 사용될 수 있다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 시편에 대한 라만분광 분석결과로서, #140 mesh로 가공된 경우와 #600 mesh로 가공된 경우에서 모두 Si-I( $521\text{ cm}^{-1}$ ) peak의 낮은 wave number로의 peak 이동현상과 Si-III 및 Si-XII의 실리콘의 고압상을 관찰할 수 있다. 현재까지 보고된 바에 따르면, 실리콘의  $521\text{ cm}^{-1}$  peak의 낮은 진동수로의 이동현상은 재료에 잔류하는 인장응력이나 다결정화에 의한 것으로 보고되고 있다.<sup>8,9)</sup> Fig. 3(b)에서는 인장응력으로 설명하기에는 상당히 큰 수준의 peak 이동이 관측되고 있으므로, 본 실험에서 나타난 peak 이동현상은 실리콘의 다결정화에 인한 것으로 생각된다. 일반적으로 라만분광법에서 단결정실리콘이 다결정질로 변화하게 되면 실리콘의  $521\text{ cm}^{-1}$  peak은



**Fig. 4.** Crystalline orientation effect on the surface roughness for the (100) and (111) wafers. (a) #140 mesh ground sample and (b) #600 mesh ground sample.

낮은 진동수영역으로 이동하면서 peak의 폭이 넓어지는 것으로 보고되고 있다.<sup>9)</sup>

특히, Fig. 3(b)에서 #600 mesh로 보다 고품격 가공한 경우에 #140 mesh로 거칠게 가공한 경우보다  $521\text{ cm}^{-1}$  peak의 이동이 더 크게 나타나는데, 이는 거칠게 가공하는 경우에 실리콘의 상전이가 일어나지 않고 바로 취성파괴가 일어났기 때문이라고 생각된다. 즉, #140 mesh의 경우 상전이에 이르기 전 큰 균열의 생성 및 전파에 의하여 재료의 파괴가 일어나는데, #600 mesh의 상대적으로 작은 균열에 의한 파괴는 재료의 표면을 다결정상으로 만들며 이는 Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같은 라만스펙트럼으로 나타난다.

Fig. 4는 (111) 웨이퍼와 (100) 웨이퍼에 대해 각각 #140 mesh와 #600 mesh의 연삭가공을 시행한 시편에 대한 미세거칠기 결과를 나타내는 PSD curve이다. 그림에서 볼 수 있듯이 (111) 웨이퍼를 가공하였을 때 (100) 웨이퍼보다 각각의 가공조건에서 표면거칠기가 크게 나타남을 알 수 있으며 또한 작은 범위에서 그 차이가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 실리콘은 다이아몬드구조를 갖는

결정질 재료이므로 재료의 전단면이 (111)면이 되어야만 하며, 따라서 본 연구의 실험결과는 재료의 가공면과 (111) 전단면과의 각도차이에 따라서 다른 가공표면을 나타낸 것이라고 이해할 수 있으며, 이러한 실리콘의 결정학적인 가공방향에 대한 표면양상의 변화에 대해서는 다른 여러 연구에서 이미 보고된 바 있다.<sup>4)</sup> 즉, (111) 웨이퍼는 가공면과 전단면이 모두 (111)면이므로 보다 쉽게 재료의 전단이 일어나며, (100) 웨이퍼인 경우 가공면은 (100)면이지만 전단면은 (111)면이 되므로 재료의 전단을 위해서는 (111) 웨이퍼에서보다는 더 큰 힘이 요구될 것이다. 따라서 동일한 가공조건인 경우 (111) 웨이퍼의 경우가 더 많이 가공되어 거친 표면을 갖게됨을 알 수 있다. Fig. 4의 PSD curve 분석은 이러한 경향을 잘 보여주고 있는데, #140 mesh와 #600 mesh grinding을 막론하고 전 범위에서 (100) 웨이퍼보다 (111) 웨이퍼의 가공표면이 더 거친 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 4(a)의 #140 mesh의 경우에는 Fig. 4(b)의 #600 mesh의 경우에는 나타나지 않았던

짧은 공간과장영역에서의 (100) 웨이퍼와 (111) 웨이퍼의 가공표면거칠기 간에 큰 차이가 나타나며, 이는 다음의 Fig. 5에서 나타낸 Fig. 4의 시편에 대한 라만스펙트럼결과로 설명할 수 있다. Fig. 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 실리콘에서 나타나는 고압상 peak은 (111) 웨이퍼에서만 나타나고 있으며, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 (111) 웨이퍼에서 더 큰 전단응력을 받고 있는 것을 반증하는 결과이다. Fig. 5(b)의 #600 mesh 연삭에 대한 라만스펙트럼에서는 (111) 웨이퍼와 (100) 웨이퍼에서 모두 실리콘의 고압상 peak이 나타나 두 경우에서 모두 실리콘의 고압상전이가 일어났음을 확인할 수 있었으며, 특히 (111) 웨이퍼에 대한 라만스펙트럼 결과는 실리콘의 521 cm<sup>-1</sup> peak의 낮은 진동수로의 이동과 강한 비정질 peak을 보여주고 있으며, 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 (111) 웨

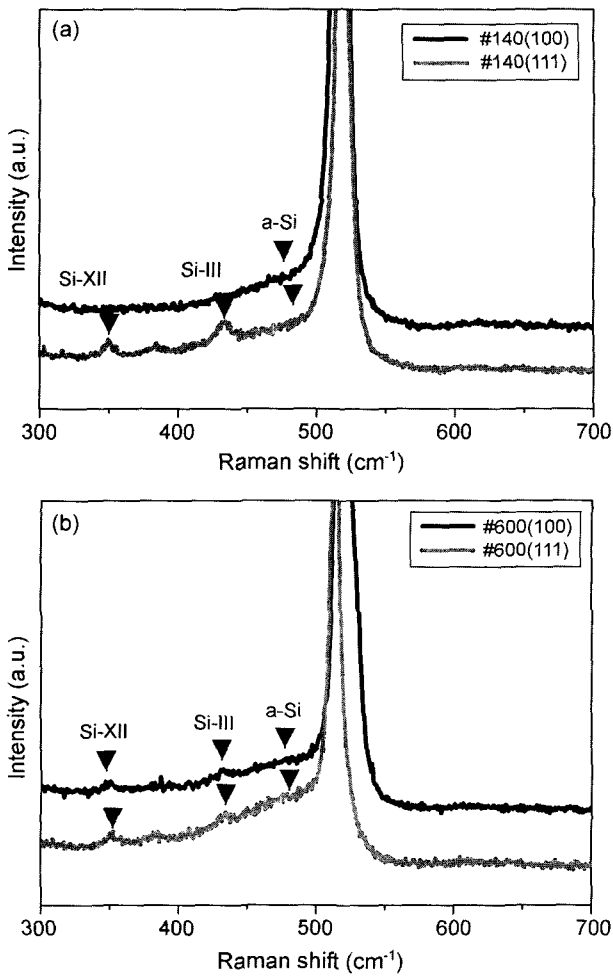


Fig. 5. Raman spectra of the effect of grinding for plane parameters of silicon: (a) #140 mesh for (100) and (111) and (b) #600 mesh for (100) and (111) planes.

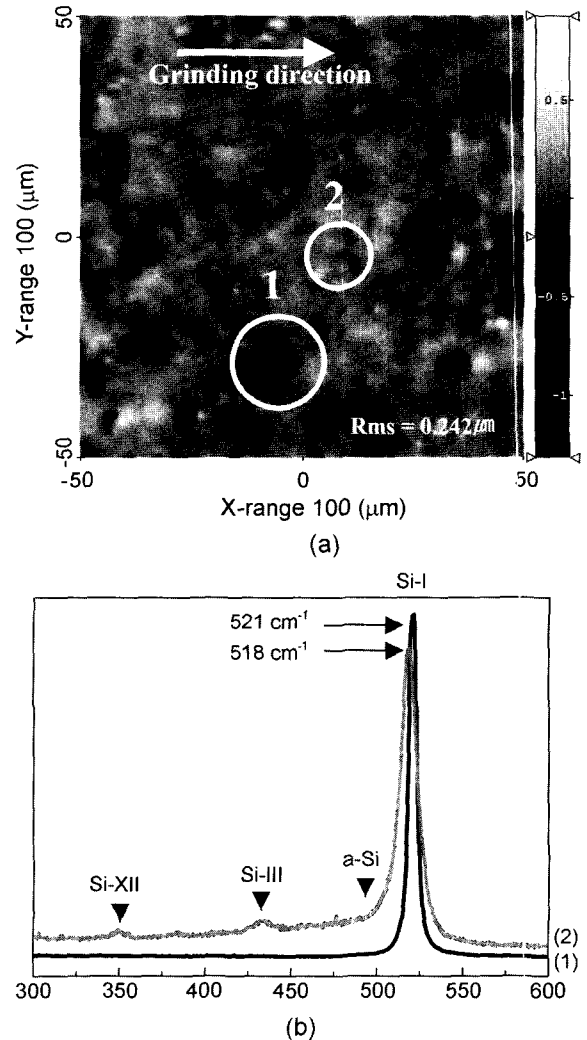


Fig. 6. Cavity effect on the ground (111) wafer (a) Image by grinding machining (1) Cavity and (2) ground surface and (b) Raman spectra of the ground (111) surface (1) Cavity and (2) ground surface.

이퍼의 가공시 가공에 의한 표면의 비정질 및 다결정상의 생성을 나타내고 있다.

Fig. 6은 연삭가공후의 실리콘의 표면 이미지와 그에 대한 라만분광분석결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 연삭가공시에 실리콘의 파편이 떨어져나가서 생성된 국부적인 구멍이(cavity)에서는 주변부위에서 고압상 및 비정질상의 peak이 나타나는 것과는 달리  $521\text{ cm}^{-1}$  위치에서 실리콘의 peak이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 연삭가공할 때 가해진 응력으로 인하여 축적된 변형 에너지(strain energy)가 새로운 표면을 형성하면서 해소됨으로써 잔류응력의 해소가 일어났기 때문으로 이해할 수 있다.

Fig. 7은 가공후의 시편을  $750^{\circ}\text{C}$ 에서 10분간 열처리함으로써 이것이 표면거칠기에 미치는 영향을 보여주는 PSD curve이며, #140 mesh와 #600 mesh 모두 열처리 후에 미세거칠기가 열처리 전 보다 낮게 나타남을 알 수 있다. 이것은 가공에 의한 원자배열의 준안정상태는 열에너지를 얻음으로써 안정된 상태로 회복될 수 있으며 이때 재

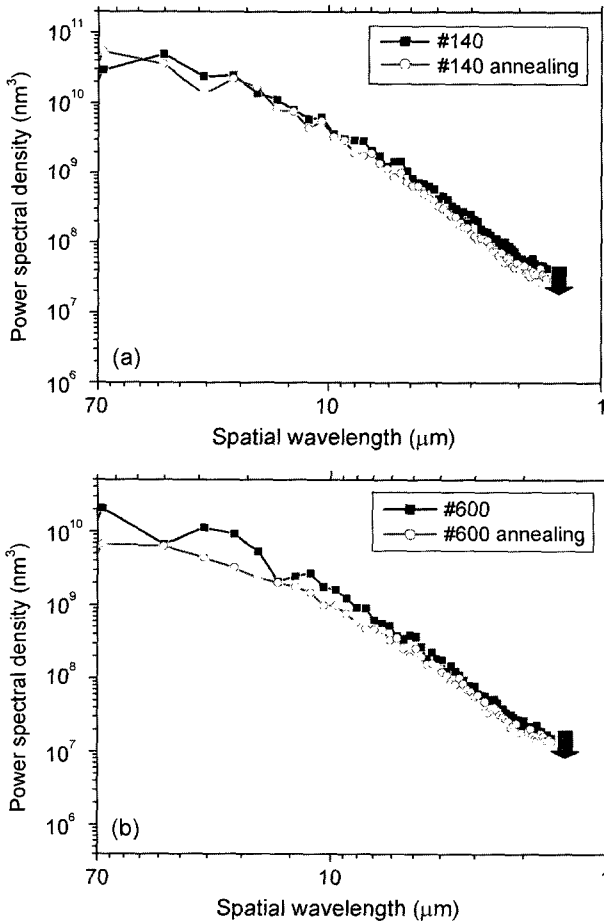


Fig. 7. Thermal annealing effect at  $750^{\circ}\text{C}$  for 10 min on the surface roughness of the (111) wafer. (a) #140 mesh ground sample and (b) #600 mesh ground sample.

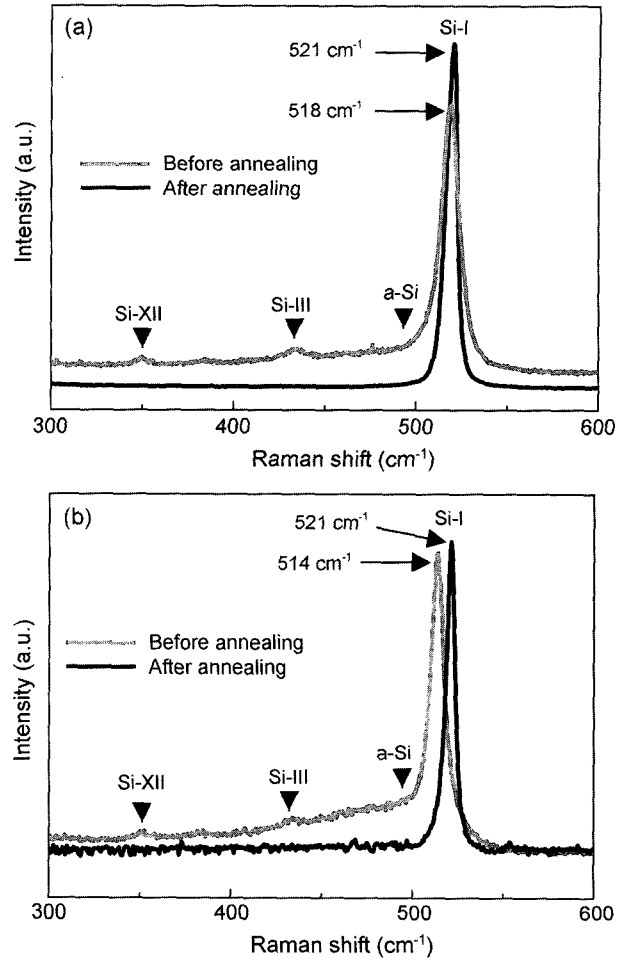


Fig. 8. Thermal annealing effect at  $750^{\circ}\text{C}$  for 10 min on the phase transformation for the (111) wafer. (a) #140 mesh ground sample and (b) #600 mesh ground sample.

료표면의 거칠기가 감소된다고 보고한 이전의 연구결과와 일치한다.<sup>10)</sup>

Fig. 8은 Fig. 7의 시편에 대한 라만분광분석 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열처리 후에는 실리콘의 고압상이 사라지고 다이아몬드 구조의  $521\text{ cm}^{-1}$  peak이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 열처리 과정을 통해 시편표면에 가해진 응력이 해소됨으로써 주 peak 이  $521\text{ cm}^{-1}$ 에서 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

### 5. 결 론

#140 mesh, #600 mesh의 연삭숫돌을 사용하여 연삭가공을 시행한 결과 고온 연삭보다 거친 연삭에서 미세거칠기가 크게 나타남을 관찰할 수 있었다. 또한 연삭가공시 실리콘 표면에 인가되는 응력으로 인한 상전이를 라만 분광법을 통해 확인할 수 있었으며 (111), (100) 웨이퍼의 미세거칠기와 이 때 다르게 분포되는 응력의 영향을 관찰

하였다. 그 결과 (100) 웨이퍼에서 보다 (111) 웨이퍼에서 가공표면은 더 거친것으로 나타났다. PSD curve 및 라만 분광분석 결과 이것은 (111) 웨이퍼의 경우 전단면과 가공면이 일치하기 때문에 더 큰 전단응력을 받았기 때문이라고 설명할 수 있었다. 또한 가공표면의 국부적인 구덩이에 대한 라만분광분석결과 일반적인 가공표면에서 얻은 라만분광스펙트럼과는 다른 스펙트럼을 얻었으며, 이는 축적된 변형에너지가 새로운 표면을 생성시키면서 응력이 해소되었기 때문으로 이해할 수 있었다.

열처리를 거친 가공표면에 대한 미세거칠기 및 라만분석결과는 열처리에 의해 미세거칠기가 감소되며 가공시 생긴 실리콘의 고압상이 제거되는 것을 관찰할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 이홍림 교수의 연구년 기간동안(2003년3월부터 2004년 2월까지) 수행된 것이며 이에 감사 드립니다. 또한 연구를 수행하는데 도움을 주신 (주)LG실트론, 엠이엠씨코리아(주) 및 (주)새빛에 감사드립니다.

### REFERENCES

1. Z. J. Pei and A. Strasbaugh, "Fine Grinding of Silicon Wafers," *I. J. Mach. & Manufacture.*, **41** 659-72 (2001).
2. T. Iizuka and Y. Okada, "Study of Scratch-induced Mechanical Damage on Silicon (111) Surfaces," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** 1427-34 (1994).
3. W. S. Blackley and R. O. Scattergood, "Crystal Orientation Dependence of Machining Damage-A Stress Model," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** [10] 3113-15 (1990).
4. T. Shibata, S. Fujii, E. Makino, and M. Ikeda, "Ductile-regime Turning Mechanism of Single-crystal Silicon," *Labortary of Process Dymamics* 129-37.
5. K. E. Puttick, C. Jeynes, M. Rudman, A. E. Gee, and C. L. Chao, "Surface Damage in Nanomachined Silicon," *Semicon. Sci. Tech.*, **7** 255-59 (1992).
6. W. S. Blackley and R. O. Scattergood, "Crystal Orientation Dependence of Machining Damage-A Stress Model," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** [10] 3113-15 (1990).
7. Z. Hang, H. Shen, and F. H. Pollack, "Comprehensive Investigation of Polish-induced Surface Strain in <100> and <111> GaAs and InP," *J. Appl. Phys.*, **64** [6] 3233-42 (1988).
8. Y. Gogotsi, G. Zhou, S. S. Ku, and S. Cetinkunt, "Raman Microspectroscopy Analysis of Pressure-induced Metallization in Scratching of Silicon," *Semicon. Sci. Tech.*, **16** 345-52 (2001).
9. J. Verhey, U. Bismayer, B. Guttler, and H. Lundt. "The Surface of Machined Silicon Wafers : A Raman Spectroscopic Study," *Semicon. Sci. Tech.*, **9** 404-08 (1994).
10. H. Okumura, T. Ishikawa, T. Akane, M. Sano, and S. Matsumoto, "Low Temperature Growth of Si on Si(111) by Gas-source MBE with Rapid Thermal Annealing : AFM Study on Surface Morphology," *Appl. Surface. Sci.*, **135** 121-28 (1998).