

## 선형열처리를 이용한 Si(100)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> || Si(100)기판쌍의 직접접합

이영민 · 송오성 · 이상현  
서울시립대학교 재료공학과

### Direct bonding of Si(100)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> || Si(100) wafers using fast linear annealing method

Young Min Lee, Ohsung Song, Sang Hyun Lee

Department of Materials Science and Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743

(2001년 2월 9일 받음, 2001년 4월 18일 최종수정본 받음)

**초 록** 절연 특성이 기존의 SiO<sub>2</sub> 보다 우수한 500 Å 두께의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>층을 두 단결정 실리콘사이의 절연막질로 채택하고 직접접합시켜 직경 10cm의 Si(100)/500 Å-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si(100) 기판쌍을 제조하였다. p-type (100) 실리콘기판을 친수성, 소수성을 갖도록 습식방법으로 세척한 두 그룹의 시편들을 준비하였다. 기판전면에 LPCVD로 500 Å 두께의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> || Si(100) 기판을 성장시키고 실리콘 기판과 고정정상태에서 가접시킨 후, 선형열원의 이동속도를 0.1mm/s로 고정시키고 선형 입열량을 400~1125W 범위에서 변화시키면서 직접접합을 실시하였다. 접합된 기판은 적외선 카메라로 계면 접합면적을 확인하고 razor blade crack opening 측정 방법으로 세정 방법에 따른 각 기판쌍 그룹의 접합강도를 확인하였다. 접합강도가 측정된 기판쌍은 high resolution transmission electron microscopy (HRTEM) 을 사용하여 수직단면 미세구조를 조사하였다. 입열량의 증가에 따라 두 그룹 모두 접합율은 큰 유의차 없이 75% 정도로, 소수성 처리가 된 기판쌍의 접합강도는 1577mJ/m<sup>2</sup>까지 선형적으로 증가하였으나, 친수성 처리가 된 기판쌍은 주어진 실험 범위에서 입열량의 증가에 따라 큰 변화 없이 2000mJ/m<sup>2</sup> 이상의 접합 강도를 보였다. 친수성 처리가 된 기판쌍의 수직단면 미세구조를 고분해능 투과전자현미경으로 확인한 결과 모든 시편의 실리콘과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si 사이에 25 Å 정도의 SiO<sub>2</sub> 자연산화막이 존재하여 중간층 역할을 함으로서 기판접합강도를 향상시키는 것으로 판단되었다.

**Abstract** We prepared 10cm-diameter Si(100)/500 Å-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si(100) wafer pairs adopting 500 Å-thick Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layer as insulating layer between single crystal Si wafers. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is superior to conventional SiO<sub>2</sub> in insulating. We premated a p-type(100) Si wafer and 500 Å-thick LPCVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> || Si(100) wafer in a class 100 clean room. The premated wafers are separated in two groups. One group is treated to have hydrophobic surface and the other to have hydrophilic. We employed a FLA(fast linear annealing) bonder to enhance the bond strength of premated wafers at the scan velocity of 0.1mm/sec with varying the heat input at the range of 400~1125W. We measured bonded area using an infrared camera and bonding strength by the razor blade crack opening method. We used high resolution transmission electron microscopy(HRTEM) to probe cross sectional view of bonded wafers. The bonded area of two groups was about 75%. The bonding strength of samples which have hydrophobic surface increased with heat input up to 1577mJ/m<sup>2</sup>. However, bonding strength of samples which have hydrophilic surface was above 2000mJ/m<sup>2</sup> regardless of heat input. The HRTEM results showed that the hydrophilic samples have about 25 Å-thick SiO layer between Si and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si and that maybe lead to increase of bonding strength.

**Key words**: 선형열처리, Si기판쌍, 직접접합

### 1. 서 론

SOI(Silicon-on-Insulator) 기판은 1986년 Si기판의 실온접합이 IBM사의 J. B. Lasky<sup>1)</sup>에 의해 개발된 이후 기존 반도체 CMOS 소자의 기판하부로의 누설전류를 적극적으로 차단하여 스피드를 향상시킬 수 있는 기판으로서 이미 고속형 반도체 시장을 중심으로 적용단계에 들어섰다.<sup>2)</sup>

이러한 SOI제조에 있어서 이제까지 ZMR (zone metlin recrystallization) 법<sup>3)</sup>, SIMOX (Separation by IMplant-ed OXYgen) 법<sup>4)</sup>, 그리고 실리콘직접접합법이 개발되었다. ZMR법은 재결정과정에서 기판의 휨현상(warping)이 발생할 가능성이 크고 재결정화된 박막의 아결정립계가 존재

하는 문제가 있고<sup>5)</sup>, SIMOX는 산소를 기판내부로 주입하므로 buried oxide의 품질이 떨어지는 단점이 있다.<sup>6)</sup> 반면 실리콘직접접합법은 고품질의 절연막을 형성시키기 용이하고 절연막층의 두께를 자유롭게 조절할 수 있어서 소자설계의 다양성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있어서 최근의 SOI 기판제조에 주로 채택되는 접합법이다.

직접접합법은 임의 절연막질을 가진 기판쌍을 고정정상태에서 가접시킨후 열처리를 이용하여 절연막층과 실리콘층의 공유결합을 유도하여 접합시키는 방법으로 최근에는 기존의 로를 이용한 열처리외에 고밀도 할로젠램프를 이용하여 특정속도로 기판쌍을 주사가열하면서 온도구배에 의해 가열시 발생하는 기상 불순물을 효과적으로 제거하여 저

온에서 접합하는 선형열처리 공정이 보고되었다.<sup>7)</sup>

SOI기판이 MEMS (micro-electro-mechanical system) 분야로 확대되면서 절연막층으로  $\text{SiO}_2$ 를 대체한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  절연층의 요구가 커지고 있다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 는 기존의 열산화  $\text{SiO}_2$ 에 비해 100배정도의 더 큰 저항도를 가져 누설전류차단이 용이하고, 유전상수 (dielectric constant)가 5.8~6.1 정도로 실리콘의 4.0보다 큰 특징이 있으며 알칼리 이온에 대한 방지막으로 우수한 특성이 알려져 있어 MEMS 공정을 필요로 하는 관련분야에서 선택적인 목적하에 용도가 다양하다.<sup>8)</sup> 특히 기존  $\text{SiO}_2$  절연막층에 비해 같은 절연도에서 더욱 얇은 박막을 채용할 수 있는 장점이 있어 수요증가가 예상된다.

본 연구는 기존 열산화막을 채용한 SOI 기판의 직접접합법에 이미 성공적으로 채용된 선형가열법을 이용하여, 같은 방법으로 LPCVD로 제조된  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 막을 절연막질로 채용한 SOI기판의 제조에서 접합강도에 중요한 역할을 할 수 있는 가접단계에서의 세정공정 의존성을 확인하기 위해 선형열원의 입열량을 변화시키며 제조하고 이들의 접합강도를 변화 확인하였다. 접합강도를 확인한 시편은 IR카메라 및 수직 단면 투과전자현미경을 활용하여 정량적인 접합면적과 접합기구를 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. LPCVD $\text{Si}_3\text{N}_4$ 기판의 준비와 전처리공정

직경 10cm인 p-type (100)Si 기판을  $785^\circ\text{C}$ 에서  $\text{Si}_2\text{Cl}_2$ 와  $\text{NH}_3$  gas를 사용하여 LPCVD법으로 500 Å 두께의  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 막을 기판전면에 성장시켜 준비하였다. 완성된 각 박막의 두께는 ellipsometer로 확인하였다. 이 때  $\text{Si}_2\text{Cl}_2$ 의 gas flow는 28.9sccm이었고,  $\text{NH}_3$  gas flow는 100sccm이었다. 실리콘 기판과 준비된  $\text{Si}_3\text{N}_4$ /Si 기판 모두  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2=3:1$ 인 SPM (Sulfuric Peroxide Mixture)와 초순수를 이용하여 세척하고 스핀건조기로 건조시켜 표면에 매우 얇은 산화막층이 형성되어 친수성이 되도록 조작한 시편들을 준비하였다. 한편 한 그룹의 기판은 10% HF를 사용하여 표면의 자연산화막을 제거하여 기판표면의 소수성을 가지도록 한 새로운 기판쌍들을 준비 하였고<sup>9)</sup>, 다른 한 그룹은 자연산화막을 그대로 두어 친수성을 가지도록 하였다. 두 그룹 시편들 모두 건조 후 즉시 30분내에 실온에서 실리콘 연마면과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  상부층을 마주보게 하고 접촉시켰다. 이 때 접촉된 기판의 계면은 계면의 수소결합으로 유지되어 계속 접합상태를 유지하였다.

### 2.2. 선형열처리공정

전처리공정에서 가접된 기판쌍의 접합강도를 향상시키기 위하여 선형열처리를 사용하였다. 선형열처리기는 기판상의 표면을 일정속도로 이동하여 할로겐 램프의 열원을 표면에 집속시키는 방법으로 Fig. 1에 선형열처리장비의 개략도를 나타내었다. 반타원형의 반사경에 의해 집속된 열원은 기판쌍 표면위에 폭 1mm의 가열영역을 만들고 이때의 표면온도를 기판쌍 상부에서 열전쌍을 이용하여 표면온도를 측정하였다. 이때 열원의 이동속도는 0.1mm/s로 고정하

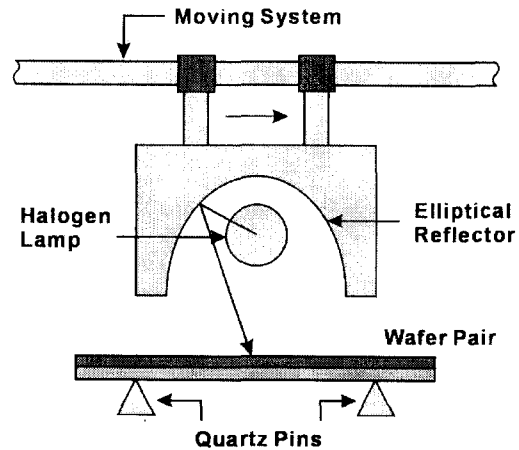


Fig. 1. Schematic illustration of Fast Linear Annealing Equipment.

고 할로겐 램프의 입열량을 400, 600, 780, 1125W 로 변환시키며 접합을 실시하였다. 이 때 기판쌍 하부 중심부에는 R type의 직경 1mm의 열전대 접점을 물리적으로 기판쌍 하부 표면부에 접촉시킨 후 선형열처리시 기판쌍의 최고 온도를 측정하였다.

한편 일반적인 furnace를 사용한 기판상의 접합을 확인하기 위해 상기 실험방법으로 친수성·소수성으로 처리하고 가접한 2개 그룹의 기판쌍을 각각  $900^\circ\text{C}$ -2hr동안 전기로에서 열처리하였다. 이 때 로의 승온 (ramp up) 조건은  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 하였다.

### 2.3. 접합강도의 측정

열처리가 끝난 기판쌍들의 접합강도를 측정하기 위해 일반적으로 사용되는 IR Camera를 이용하여 접합면 전체를 관찰하여 내부의 접합면적을 비파괴적으로 확인하였다.<sup>10)</sup> 접합율을 확인한 시편은 Crack Opening법을 사용하여 기계적인 접합강도를 측정하였다. 촬영된 결과물을 Image pro™ 소프트웨어로 정확한 접합면적을 계산하여 결함이 발생된 영역/전체 기판크기의 비를 백분율로 표시한 접합률로 접합의 건전성을 확인하였다.

### 2.4. 접합쌍의 미세구조 분석

완성된 기판쌍들의 수직 단면을 HRTEM으로 관찰하였다. 수직단면 투과전자현미경 관찰을 위한 단면시편은 다이아몬드 절단기로 절단하고 약 20 $\mu\text{m}$  두께까지 트리포드 (tripod)를 이용하여 연마하고 PIPS (precision ion polishing system 정밀 이온 연삭 시스템)를 이용하여 전자빔이 투과될 정도로 얇게 가공하여 관찰하였다. 이 때 소수성 처리가 된 기판은 비교적 접합강도가 작아 절단작업중 분리가 일어나 미세구조를 확인할 수 없었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 열처리된 기판쌍의 접합면 관찰

Fig. 2에 선형열처리법으로 접합된 Si/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  // Si기판쌍의 선형입열량에 따른 IR Camera 결과를 나타내었다. 그림과 같이 사진에 나타난 입열량의 명암차이로 접합정도를

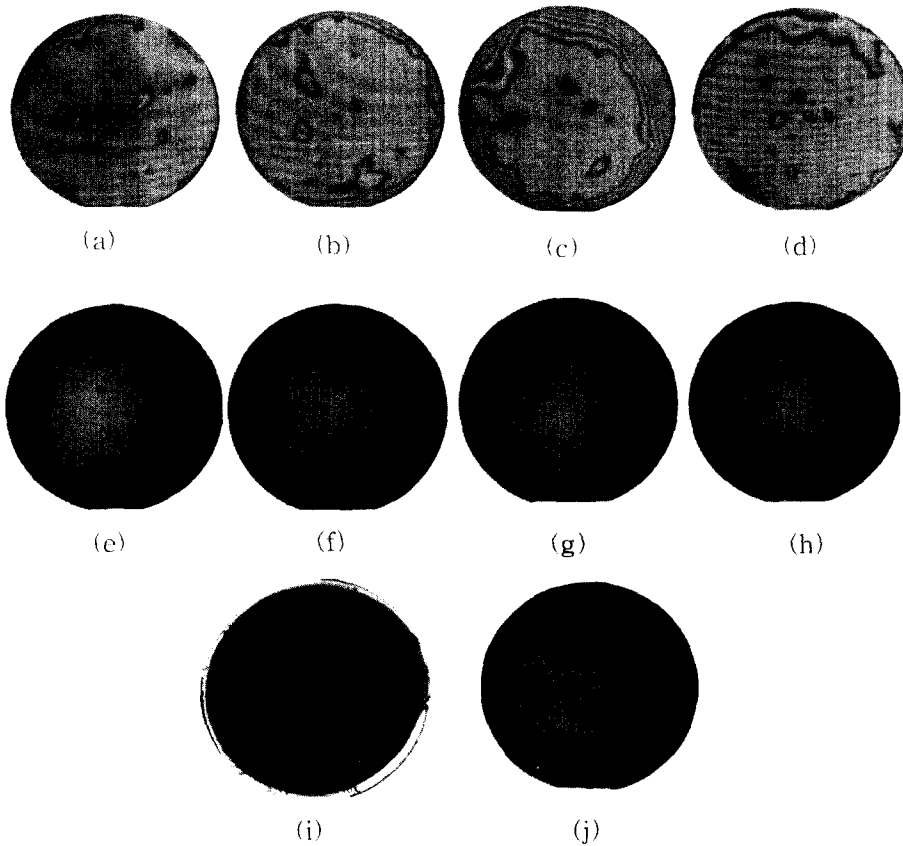


Fig. 2. IR images of Si(100)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> || Si(100) wafer pairs of hydrophobic with heat input of (a) 400W, (b) 600W, (c) 780W, (d) 1125W and hydrophilic with heat input of (e) 400W, (f) 600W, (g) 780W, and (h) 1125W and (i) debonded image of furnace annealed hydrophobic wafer pairs, (j) furnace annealed hydrophilic wafer pairs.

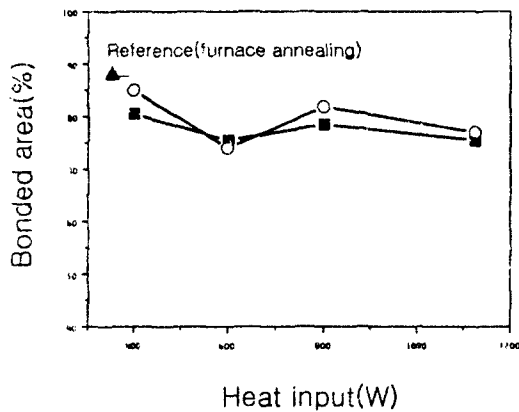


Fig. 3. Plot of bonded area with the heat input of wafer pairs for ○ hydrophilic, ■ hydrophobic and ▲ furnace annealing.

판단할 수도 있었다. 접합면은 입열량에 따라 큰 의존성이 75% 이상의 접합을 보이고 내부에 직경 1cm 정도의 다수 보이드결함이 무작위로 생성되는 것을 볼 수 있었다. HF로 자연산화막을 제거한 경우와 제거하지 않은 경우 모두 접합 면적에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았다. 한편 기존의 로 내 열처리법을 사용하여 접합을 시킨 기판쌍의 경우에 소수성 전처리를 한 기판쌍은 전혀 접합이 이루어지지 않았으며 친수성 전처리를 한 경우에는 88%의 접합면적을 얻을 수 있었다.

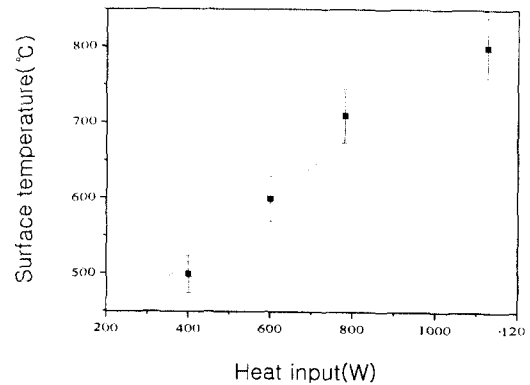


Fig. 4. Plot of surface temperature versus heat input.

Fig. 3은 입열량에 따라 Fig. 2의 IR 사진들에서 나타난 등고선 패턴부를 비접합면으로 상정하고 이미지 소프트웨어로 계산한 접합면적의 백분율 결과이다. 입열량에 따라 75% 정도의 접합율을 보여 접합율의 의존성은 없다고 판단되었다. 접합율이 계면 개스가 선형열처리시 포획되는 현상에 의해 주로 결정된다고 가정하면, 내부개스의 포획량은 주어진 입열량 변화조건에서 선형 입열량에 따라 큰 차이가 없었다고 판단되었다.

Fig. 4에 입열량에 따른 표면최고온도를 나타내었다. 주어진 실험범위에서 입열량이 증가함에 따라 선형적으로 표

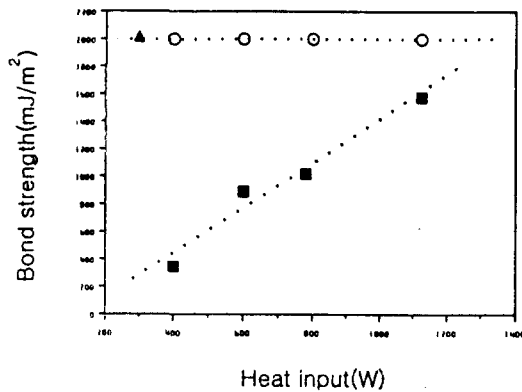


Fig. 5. Plot of bond strength versus heat input for ○ hydrophilic, ■ hydrophobic and ▲ furnace annealing.

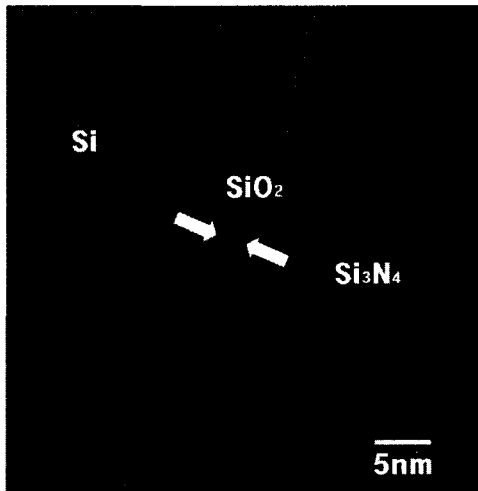


Fig. 6. HRTEM cross section view of Si/SiO<sub>2</sub> // Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si wafer pairs.

면최고온도가 선형적 증가하였다. 선형열처리법에 의해 주어진 온도범위에서 실험범위내 입열량 ( $x$ ) 에 따른 표면온도 ( $y$ , °C) 는 선형적인 관계식인  $y=0.42x+350$  으로 근사할 수 있었다.

Fig. 5에는 입열량에 따라 Crack opening 법에서 계산된 접합강도를 나타내었다. 소수성 전처리를 하고 선형열처리를 한 기판쌍은 입열량에 따라 접합강도가 증가하여 1125W에서는 1577mJ/m<sup>2</sup> 이상의 접합강도를 얻었다. 친수성 전처리와 선형열처리를 한 기판쌍은 입열량에 관계없이 2000mJ/m<sup>2</sup> 이상의 접합강도를 보였는데 이는 SOI기판제조에 필수적인 CMP 등의 후속공정에도 기판쌍의 접합이 유지될 수 있는 정도라고 판단되었다. 따라서 선형열처리법을 통해 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 절연막질로 채용한 SOI 기판의 접합을 시행할 경우 친수성 전처리가 보다 유리하다고 판단되었으며 로내 열처리를 행한 경우보다도 온도는 1/2 이하의 저온에서 가능하고 작업시간도 1/10 정도에서 비슷한 품질의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 제작이 가능하여 비교 우위가 있다고 판단되었다.

Fig. 6은 친수성 전처리를 하고 선형열처리를 행한 기판

쌍의 HRTEM 단면 촬영 결과이다. 그림에서 검게 나타난 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>층과 비정질 층이 보이는데 이는 자연산화막으로 판단되었고, 이것으로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 Si 사이에 25±5Å 이내의 자연산화막이 존재함을 확인할 수 있다. 이것이 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 실리콘층 사이의 중간층으로 작용하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 SiO<sub>2</sub> 결합을 용이하게 하여 이러한 중간 비정질층이 없는 소수성 처리 기판쌍보다 접합강도가 증가한 원인으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

500Å 두께의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 절연막질로 채용하여 선형열처리기를 이용하여 입열량 400~1175W 범위에서 조절하여 SOI기판을 제조하였다. 접합이 완성된 시편을 IR 카메라로 내부의 접합면을 확인한 결과 약 75~85%의 접합율을 보였고, 소수성 전처리가 된 기판쌍의 경우 입열량에 따른 의존성은 없었다. 완성된 시편의 접합강도를 Crack opening 법으로 측정된 결과 소수성 전처리를 한 기판쌍의 경우 입열량의 증가에 따라 1125W에서 최대 1577mJ/m<sup>2</sup>까지 선형적으로 강도가 증가하였고 자연산화막을 제거하지 않아 접합면에 약 25Å 두께의 SiO<sub>2</sub> 층이 남아있는 친수성 접합의 경우 접합강도가 입열량에 관계없이 2000mJ/m<sup>2</sup> 이상으로 기존의 로내 열처리에 비해서도 온도와 에너지면에서 비교 우위에 있으며 반도체 기판으로 채용될 경우 CMP 등의 후속공정 적용이 가능하다고 판단되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2000년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. J. B. Lasky, Appl. Phys.Lett., **48**, 78 (1986).
2. W.P.Maszara, G.Goetz, A.Caviglia J.B. McKittelick, J. Appl. Phys., **64**, 4993 (1988).
3. Miaoulis, P. Y. Wong, J. D. Lipman, and J. S. Im, J. Appl. Physic., **69** (15), (1991).
4. I. N. Izumi, MRS Bulletin, **123** (12), 20 (1998).
5. J. H. Ryu, Ph.D. thesis, (Seoul National University, 1995).
6. Q.-Y. Tong, and U. Gesele, J. Electronic Materials, **22** (7), (1993).
7. J. W. Lee, Ph.D., thesis (Seoul National University, 1999).
8. S.K. Ghandi, VLSI Fabrical Principles, John Wiley & Son, (1983).
9. Y. Backlund, K. Hermansson, and L. Smith, J. Electrochem. Soc, **139** (8), 2299 (1992).
10. T.Martini, J.Steinkirchner, und U.Gosele, J. Electrochem. Soc, **31** (1), 3549 (1997).