[논 문] 한국재료학회지
*Korean Journal of Materials Research*
Vol. 8, No. 10 (1998)

# Direct Wafer Bonding법에 의한 InP 기판과 $Si_3N_4$/InP의 접합특성

김선운 · 신동석 · 이정용* · 최인훈
고려대학교 공과대학 재료금속공학부
*한국과학기술원 재료공학과

# The Characteristics of the Direct Wafer Bonding between InP Wafers and $Si_3N_4$/InP

Sun-Woon Kim, Dong-Suk Shin, Jeong-Yong Lee* and In-Hoon Choi
*Division of Materials Science & Engineering, Korea University, Seoul 136-701*
** Department of Materials Science & Engineering, KAIST, Daejon 305-701*

(1998년 6월 15일 받음, 1998년 8월 4일 최종수정본 받음)

**초 록** n-InP(001) 기판과 PECVD법으로 $Si_3N_4$(200 nm)막이 성장된 InP 기판사이의 direct wafer bonding을 분석하였다. 두 기판을 접촉시켰을 때 이들 사이의 결합력에 크게 영향을 주는 표면 상태를 접촉각 측정과 AFM을 통해서 분석하였다. InP 기판은 50% 불산 용액으로 에칭하였을 때 접촉각이 5°, RMS roughness는 1.54 Å 이었다. $Si_3N_4$는 암모니아수 용액으로 에칭하였을 때 RMS roughness가 3.11 Å이었다. InP 기판과 $Si_3N_4$/InP를 각각 50% 불산 용액과 암모니아수 용액에 에칭한 후 접촉시켰을 때 상당한 크기의 초기 결합력을 관찰할 수 있었다. 기계적으로 결합된 시편을 580℃-680℃, 1시간동안 수소 분위기와 질소 분위기에서 열처리하였다. SAT(Scanning Acoustic Tomography)측정으로 두 기판 사이의 결합여부를 확인하였다. shear force로 측정한 InP 기판과 $Si_3N_4$/InP 사이의 결합력은 $Si_3N_4$/InP 계면의 결합력만큼 증가되었다. TEM과 AES를 이용해서 direct wafer bonding 계면과 PECVD 계면을 분석하였다.

***Abstract*** The direct wafer bonding between n-InP(001) wafer and the $Si_3N_4$(200 nm) film grown on the InP wafer by PECVD method was investigated. The surface states of InP wafer and $Si_3N_4$/InP which strongly depend upon the direct wafer bonding strength between them when they are brought into contact, were characterized by the contact angle measurement technique and atomic force microscopy. When InP wafer was etched by 50% HF, contact angle was 5° and RMS roughness was 1.54 Å. When $Si_3N_4$ was etched by ammonia solution, RMS roughness was 3.11 Å. The considerable amount of initial bonding strength between InP wafer and $Si_3N_4$/InP was observed when the two wafer was contacted after the etching process by 50% HF and ammonia solution respectively. The bonded specimen was heat treated in $H_2$ or $N_2$ ambient at the temperature of 580℃-680℃ for 1hr. The bonding state was confirmed by SAT(Scannig Acoustic Tomography). The bonding strength was measured by shear force measurement of $Si_3N_4$/InP to InP wafer increased up to the same level of PECVD interface. The direct wafer bonding interface and $Si_3N_4$/InP PECVD interface were chracterized by TEM and AES.

## 1. 서 론

높은 효율과 동작특성을 갖는 전기소자나 광전소자를 설계하기 위해서는 이종 재료들간의 자유로운 집적을 필요로 한다. 그러나 이러한 집적은 반도체 재료들간의 격자상수 불일치와 결정학적 방위의 제약을 받는다. 격자상수가 다른 재료간에 heteroepitaxy 성장을 할 경우 threading dislocation과 같은 결함이 많은 막이 성장되어 다수 운반자를 이용한 소자에의 응용은 가능하지만 반도체 레이저와 같은 소수 운반자를 이용한 소자에는 치명적이어서 신뢰성 있는 소자제작을 어렵게 한다.[1,2] 최근 들어 heteroepitaxy 성장의 한계를 극복하고, 다양한 재료들간의 집적화 혹은 특정 기능을 수행하는데 필요한 소자들의 단일 기판 상으로의 집적화를 목적으로 접합 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Van der Waals 결합력을 이용한 epitaxial lift-off (ELO),[3] eutectic metal bonding,[4] direct wafer bonding[5~7] 등이 연구되고 있다. 물질수송현상(mass transport phenomenon)을 이용한 wafer fusion의 경우 이종 계면간에 중간층 없이 바로 화학적 결합을 이루는 direct wafer bonding의 한 경우이다. 두 기판사이에서 물질수송현상에 의한 완전한 원자적 결합이 일어나 광전집적소자(OEIC ; Opto-Electronic Integrated Circuit)의 응용뿐만 아니라 새로운 구조의 소자 제작이 가능해진다. 격자상수 불일치에 대한 한계가 제거됨으로 인해 Ⅲ-Ⅴ 화합물 반도체의 Si 기판으로의 집적화를 이룰 수 있고,[7,8] 광전소자의 경우 vertical cavity surface emitting laser(VCSEL)에 이용될 뿐만 아니라[9] 높은 gain과 bandwidth, 낮은 noise와 temperature sensitivity를 얻기 위한 InGaAs-Si avalanche photodetector(APD)에도 이용되며,[10] processor power가 증가함에 따라 큰 문제가 되고 있는 interconnection의

한계를 극복하기 위한 방법으로 연구되고 있는 optically controlled field-effect-transistor (FET) 에도 direct wafer bonding 기술이 이용되고 있다.[11] 또한 기판과 결정학적 방위가 서로 다른 소자의 집적 (free-orientation integration) 을 이룰 수 있다.[12] diamond heat sinks의 경우 높은 열전달계수와 기계적 강도를 이용하기 위해 direct bonding에 이용되고, silicon wafer bonding의 경우 giga-bit DRAM cell 구조로서 buried capacitor를 갖는 Silicon-on-Insulator (SOI) 구조를 형성하기 위한 방법으로,[13,14] 혹은 high power device나 sensor, 그 밖의 응용을 목적으로 활발히 연구되고 있으나 화합물 반도체와 절연층간의 direct wafer bonding은 아직 보고된 바가 없다.

본 실험에서는 n-InP (001) 기판과 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 법으로 $Si_3N_4$ (200 nm) 가 성장된 n-InP 기판간의 direct wafer bonding에 관한 연구를 수행하였다. 에칭용액에 따른 기판의 표면상태와 열처리 조건에 따른 결합력의 변화와 접합 계면의 구조를 관찰하여 GaAs-InP, Si-Si 접합에서 이미 보고되고 있는 direct wafer bonding 메카니즘과 비교하였다. 이러한 형태의 접합은 화합물 반도체에서도 silicon처럼 buried insulator를 갖는 즉, amorphous insulator 위에 epitaxial layer가 형성된 SOI 구조를 만들 수 있으므로 이전에는 불가능하였던 amorphous layer 위로의 epitaxy 성장이 가능해지고 3차원으로의 집적이 가능하여 새로운 형태의 소자 제작에 응용될 수 있다. 반도체 레이저에서는 전류 차단막으로 이용하여 p-n-p-n thyristor 구조에서 문제가 되는 parastic capacitance를 줄일 수 있으며[15] 또한 optoelectronic integrated circuit에도 이용될 것으로 기대된다.[16]

## 2. 실 험 방 법

Direct wafer bonding 기술은 표면처리, 상온에서 두 기판의 접촉, 그리고 압력을 가한 상태에서의 열처리 세 단계로 구성된다. 표면처리 단계는 유기물과 산화물을 제거하기 위해서 뿐만이 아니라 계면에서의 접합을 위한 표면의 화학적인 활성화를 형성하기 위해 실시한다. 두 기판이 표면처리 단계를 거치고 나면 Van der Waals force에 의한 접합을 확인할 수 있고 화학적인 반응과 재결정화는 고온 열처리 과정에서 일어난다. 표면처리에는 습식과 건식 두 가지 방법이 있다. 습식 접합에서는 산화물 제거를 위한 에칭용액에 두 시편을 담근 상태에서 접촉을 시키고 건식 접합에서는 에칭용액에서 산화물을 제거하고 표면을 건조시킨 후 시편을 접촉시킨다. 본 연구에서는 건식 접합으로 실험하였고 사용한 기판은 n-InP (001) 과 PECVD법으로 $Si_3N_4$가 200 nm 성장된 n-InP (001) 이다. InP 기판을 $H_2SO_4$:$H_2O_2$:$H_2O$ = 3:1:1 용액에 에칭하여 기판 표면의 결함이 있는 층을 제거한 후 HF 용액에서 산화막을 다시 에칭해 내고 $Si_3N_4$/InP은 $NH_4OH$ 용액에 에칭한 후 초순수 (deionized water) 로 세정하였다.

결합력에 큰 영향을 주는 표면 거칠기를 관찰하기 위해 atomic force microscopy (AFM) 를 이용해서 RMS roughness를 측정하였고[17,18] 에칭 후 표면의 화학적인 활성화를 관찰하기 위해 그림 1과 같이 기판에 초순수를 떨어뜨려 HF 용액의 농도에 따른 접촉각을 광학 현미경을 이용해서 측정하였다.

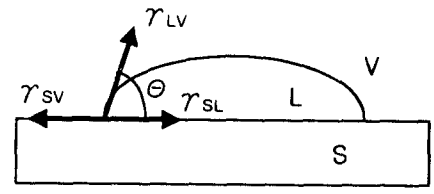


Fig. 1. Schematic diagram of a liquid drop on a surface, and forces acting at the line of three phase contact.

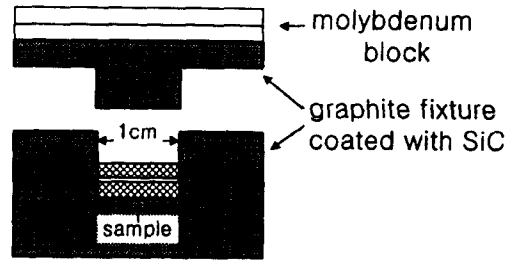


Fig. 2. Schematic cross-sectional view of the graphite fixture for direct wafer bonding.

Young' equation

$$\gamma_{LV} \times \cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (1)$$

실험식

$$\gamma_{SL} = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - 2\sqrt{\gamma_{LV} \times \gamma_{SV}} \times \exp[-\beta(\gamma_{LV} - \gamma_{SV})^2] \quad (2)$$

식 (1) 과 식 (2) 를 합친 식

$$\cos\theta = -1 + 2\sqrt{\frac{\gamma_{SV}}{\gamma_{LV}}} \times \exp[-\beta(\gamma_{LV} - \gamma_{SV})^2] \quad (3)$$

을 이용해서 표면 에너지를 계산하였다.[19~20]

미세한 입자라도 표면에 붙지 않도록 청정실 (clean room) 에서 세척과정을 실시해야 하며 접촉할 때 기포 (bubble) 가 생기지 않도록 균일하게 압력을 가해 주어야 한다. 표면처리 후 산화막이 재생성되는 것을 막기 위해 곧바로 시편을 접촉시킨 후 열처리를 하였다. 그림 2는 열처리를 위해 두 시편을 접촉시키고 압력을 가하기 위한 graphite fixture를 나타낸다. 아래쪽에 1 cm×1 cm 홈을 만들어서 시편을 넣고 cover를 덮은 후 molybdenum block을 사용해서 400-1600 g/cm$^2$의 압력을 가해 주었다. 이 graphite fixture를 수소 분위기와 질소 분위기 형성이 가능한 수평 전기로에 넣고 580℃-680℃ 열처리를 한시간 동안 실시하였으며 수소와 질소의 유량은 50-100 sccm으로 유지하였다.

direct wafer bonding된 시편의 기계적인 접합 강도를

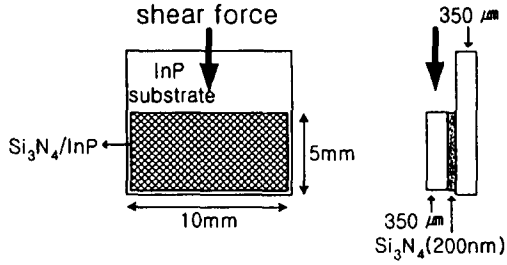


Fig. 3. Schematic diagram showing the method of bonding strength measurement.

알아보기 위해 그림 3과 같은 shear force로 tensile test를 실시하여 열처리 온도, 분위기, 냉각 속도에 따른 접합 강도의 변화를 알아보았다. 이 실험으로 떨어진 기판의 표면을 광학 현미경으로 관찰하였다. 투과전자현미경(TEM)과 auger electron spectroscopy(AES)를 통해 접합 계면과 $Si_3N_4$/InP 계면을 비교하였으며 scanning acoustic tomography(SAT)를 이용해서 열처리 후 시편 전체의 접합 여부, 기포의 존재 여부를 확인하였다.[21]

## 3. 결과 및 고찰

먼저 AFM을 통해서 InP 기판과 $Si_3N_4$/InP의 에칭 용액에 따른 RMS roughness를 측정하였다. 두 기판간의 인력은 주로 짧은 거리에서 작용하는 분자간의 힘이므로 접촉하는 거리가 멀어지면 그 힘은 급격히 감소하게 된다. 따라서 접합을 이루기 위해서는 표면 거칠기를 낮추어 충분한 근접성을 이루도록 해야 한다. InP 기판은 일반적으로 자연 산화막을 제거하기 위해 사용하는 HF 용액으로 에칭하고 그 농도에 따른 변화를 관찰하였으며 $Si_3N_4$는 silicon 공정에서 사용되는 RCA ($NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ = 1:1:5)에 따른 변화를 관찰하였다. 에칭시 표면에서 일어나는 반응을 살펴보면 InP 표면이 에칭 용액 내의 물분자에 의해서 느리게 산화되는 반응과 HF 분자에 의해 이 산화막이 빠르게 제거되는 반응 두 가지가 동시에 일어난다. 그래서 에칭 속도는 느리게 반응하는 hydroxyl 농도에 좌우되고 따라서 HF 농도가 낮은 즉 hydroxyl 농도가 높을 때 빠른 에칭 속도를 보이게 된다. 그림 4에서 보듯이 HF 농도가 높을 때는 에칭 속도가 느려서 원래의 자연 산화막과 InP 계면간의 거칠기가 그대로 유지되었고 HF 농도가 낮을 때는 거칠기가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 silicon에 대해 보고된 결과와 일치하였다.[18] 따라서 HF 농도가 높을수록 표면 거칠기가 낮아져서 열처리 후의 결합력이 증가할 것으로 예상된다. $Si_3N_4$/InP 의 경우 $NH_4OH$가 silicon을 에칭시키고 $H_2O_2$가 들어가면 산화 작용에 의해 에칭 속도가 낮아진다. RMS roughness는 PECVD로 성장시킨 층이므로 1.54 Å인 InP 기판보다 2배 더 거친 3.00 Å을 나타내었다. 큰 거칠기를 갖고 성장되어서 에칭용액에 따른 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다.

표면의 화학적 상태를 알아보기 위해 water-drop 접촉각 측정을 하였다. InP 기판을 HF 용액에 에칭시키면 자연 산화막이 제거되면서 생긴 dangling bond에는 F 원자가 붙고 이를 초순수로 세정하면 F 원자가 hydroxyl기로 대체된다. 이것은 표면을 친수성으로 만들게 하고 따라서 접촉각을 낮추게 한다. 그림 5는 광학 현미경으로 측정한 각도와 식 (3)에 대입하여 얻은 표면 에너지를 계산한 것이다.[19~20] 50% HF 용액의 경우 71.87 mJ/m²의 높은 표면 에너지를 나타내었다.

중간 접착제가 필요 없는 direct wafer bonding은 접촉하는 기판 표면의 원자간 혹은 분자간 인력에 의해 이루어진다. 열처리 후의 결합력을 높이기 위해서는 먼저 상온에서 InP 기판과 $Si_3N_4$/InP 간의 결합 즉 self adhesion이 잘 이루어져야 한다. 표면이 친수성인 경우 주로 hydroxyl기 사이의 인력에 의해 결합이 일어나며 HF 용액의 농도가 높으면, 에칭으로 표면 산화물이 제거되고 생긴 dangling bond에 붙은 F 원자의 농도가 높을 것이고 따라서 초순수

Table 1. The measured RMS roughness of $Si_3N_4$/InP surface. (etching time 40 sec)

| sample | RMS roughness | Average roughness |
|---|---|---|
| water | 3.00 | 2.43 |
| $NH_4OH$ | 3.11 | 2.48 |
| RCA($NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ = 1:1:5) | 3.46 | 2.67 |
| RCA($NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ = 0.5:1:5) | 3.36 | 2.70 |

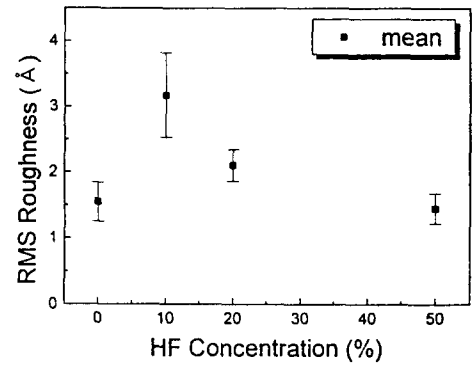


Fig. 4. Mean values of the measured RMS roughness of InP (001) surface vs. HF concentration. (etching time - 30 sec)

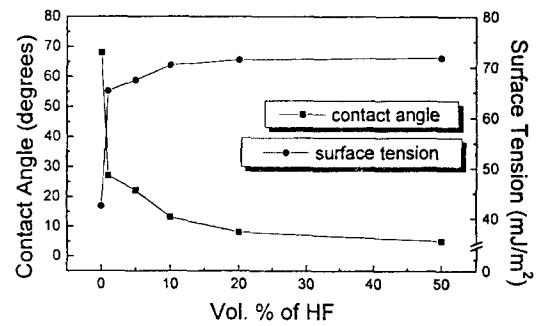


Fig. 5. Contact angle measurements of InP after etching process by various HF concentration. Etching time 30 sec, 4.5$\mu\ell$, Reproducibility ±2°, $\beta$=0.0001247(m²/mJ)², $\gamma_{LV}$=72.14 mJ (water at 25℃).

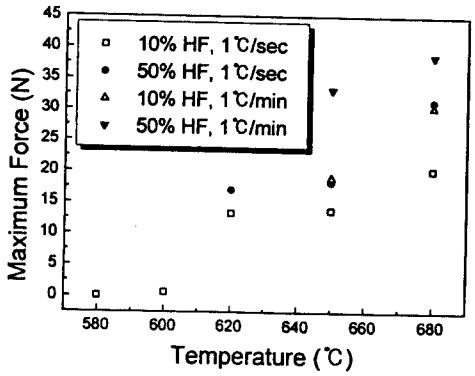


Fig. 6. Dependence of bonding strength on treatment temperature and surface treatment.

세정 후 F 원자 자리를 채우는 hydroxyl기의 농도도 증가하여 접촉각이 낮아지고 결합력이 높아진다. 결국 본 실험에서 상온에서의 초기 결합은 표면에 붙은 hydroxyl기가 결합 다리 역할을 하고 높은 표면 에너지를 낮추기 위해 수소 결합이 이루어지는 것으로 생각된다. 즉, 접촉하는 기판 표면에서 InP-OH···(HOH)···HO-$Si_3N_4$와 같은 화학 상태를 이루게 되고, 이 때 물분자는 세 개의 떨어진 개별 분자나 dimer로 존재하기보다는 triplet 형태로 존재하는 것이 더 안정하기 때문에 물분자가 결합 다리 역할을 할 수 있다. Hydroxyl기 크기가 1.0 Å이고 얼음에서 두 개의 수소가 결합된 산소 원자간의 거리가 2.76 Å이므로 친수성 표면을 가진 경우 10 Å 거리도 물분자를 통해서 상온에서의 결합을 이룰 수 있는 것으로 보고되고 있다.[22]

그림 6은 표면처리와 열처리 조건에 따라 shear force로 tensile test를 실시했을 때 기판의 분리가 일어나는 최대 힘을 나타낸 결과이다. 시편의 크기는 5×10 $mm^2$로 균일하게 하고 $Si_3N_4$/InP는 모두 $NH_4OH$로 에칭하였으며 수소 분위기에서 400 g/$cm^2$의 압력으로 한시간 동안 열처리를 하였다. 10% HF로 InP 기판을 에칭하고 1℃/sec로 냉각시켰을 때 580℃에서는 접합이 전혀 일어나지 않았으며 600℃에서는 접합이 되었으나 0.6 N에서 떨어졌다. 620℃부터는 $Si_3N_4$가 PECVD 계면에서 떨어져서 direct wafer bonding 쪽으로 전이되는 현상을 보였다. 이것은 direct wafer bonding의 결합력이 $Si_3N_4$/InP 쪽보다 더 크다는 것을 의미하며 따라서 이후 공정에서도 이용될 수 있는 결합력을 갖는 것으로 생각된다. 열처리 온도, HF 농도가 높을수록 그리고 냉각 속도가 낮을수록 결합력이 커지고 전이되는 $Si_3N_4$의 양도 늘어남을 확인할 수 있었다.

그림 7에서는 tensile test 후 $Si_3N_4$가 전이되어 붙은 InP 기판 표면의 광학사진이다. 그림 7(a)에서는 전이된 $Si_3N_4$의 양이 적고 전이되지 않은 InP 표면에는 한쪽 방향으로 결무늬를 갖는 흠이 생성되었다. 이것은 상온에서의 초기 결합을 할 때 접촉된 기판사이에 생긴 틈으로 고온 열처리시 상대적으로 휘발성이 큰 P 원자가 빠져나가면서 만든 것으로 추측된다. 그림 7(b)의 경우 전이된 $Si_3N_4$의 양이 많았으며 그림 7(a)에 비해 열처리 온도가 높았음에도 불구하고 전이가 일어나지 않은 InP 표면이 깨끗한 모습을 보였다. 그 원인은 상온에서의 초기 결합 즉 self adhesion이 잘 이루어져 고온에서 P 원자의 휘발이 일어나지 않았기 때문이고 이것은 HF 농도 증가에 따라 표면 에너지가 높은 상태에서 접촉시켰기 때문이라고 생각된다. 온도가 높을수록 결합력이 증가하는 것은 접합을 위한 In 원자의 이동도(mobility)가 높아져 접합 계면에서 원자 재배열이 보다 활발하게 일어났기 때문이며,[7] 냉각 속도가 느릴수록 결합력이 증가한 것은 상대적으로 고온 유지 시간이 길고 냉각시 겪는 열충격이 완화되었기 때문으로 생각된다.

고온 열처리시 일어나는 계면에서의 원자 재배열 현상은 AFM 표면사진으로도 확인할 수 있었다. 그림 8은 열처리 전의 InP 표면과 열처리 후의 떼어낸 InP 표면의 AFM 사진이다. 압력이 가해진 기판을 열처리하면 표면 에너지를 낮추고 두 기판사이의 미세 공극을 채우기 위해 상대적으로 이동도가 높은 In 원자가 아래 화학식과 같은 과정을 통해 이동(migration)하게 된다. 그림 8(a)에서는 에칭 후 표면의 step을 관찰할 수 있으나 그림 8(b)에서는 이것이 원자 재배열에 의해 무너지는 것을 확인할 수 있었다.

$$In(s) + 1/2P_2(g) \leftrightarrow InP(s) \quad (4)$$

그림 9는 그림 7과의 비교를 위해 InP 기판과 $Si_3N_4$/Si를 direct wafer bonding 시킨 시편을 tensile test로 떼어낸 표면 사진이다. 이 경우 가해준 압력이 두 기판간의 열

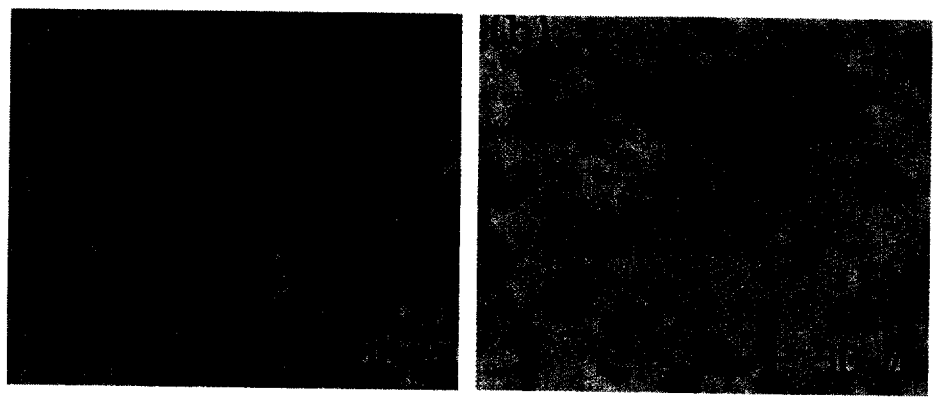

Fig. 7. Optical microscopic photographs of InP substrate surfaces. (a) 650℃, 10% HF, 1℃/sec, (b) 680℃, 50% HF, 1℃/sec

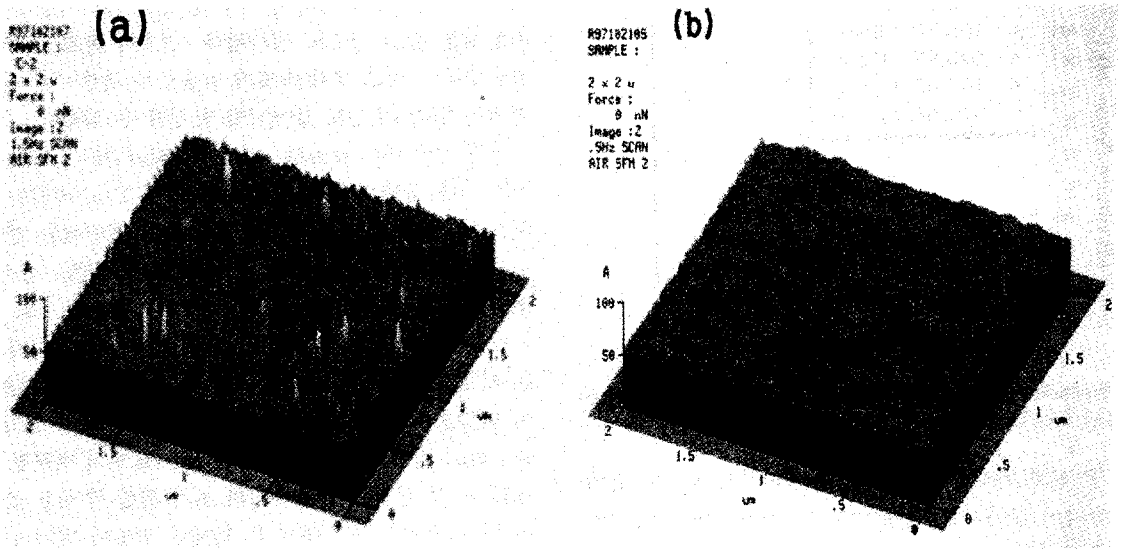


Fig. 8. The AFM images of InP surface. (a) before direct wafer bonding (b) after tensile test.

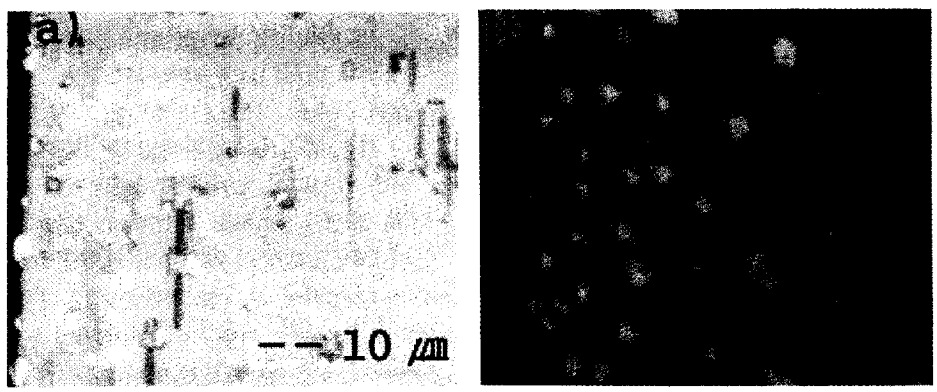


Fig. 9. Optical microscopic photographs of substrate surfaces in InP-$Si_3N_4$/Si direct wafer bonding. (680℃, 10% HF, 1℃/min) (a) InP (b) $Si_3N_4$/Si

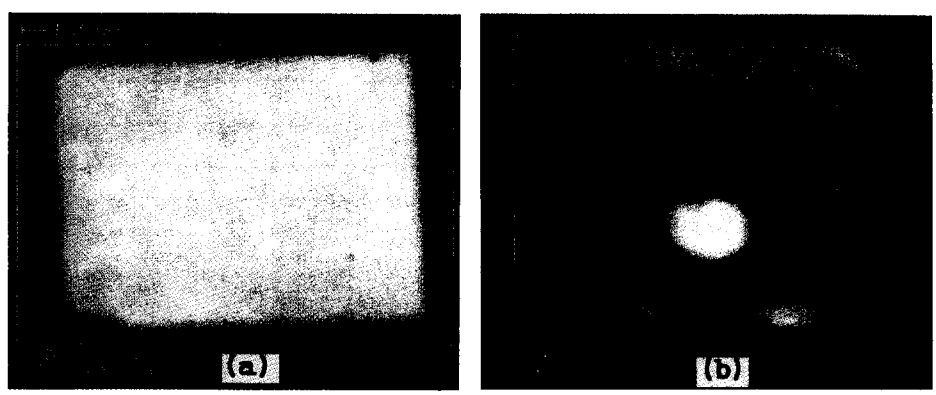


Fig. 10. The SAT images of direct wafer bonding. (a) InP-$Si_3N_4$/InP interface (b) InP-$Si_3N_4$/Si interface.

팽창계수 차이(InP : $4.75\times10^{-6}$/℃, Si : $2.59\times10^{-6}$/℃)를 극복할 만큼 크지 않기 때문에 상온에서의 초기 결합은 가열시 떨어지게 되고 계면사이에 생긴 틈으로 앞에서 설명한 것과 같은 P 원자의 휘발이 일어나고 고온 열처리시 원자 재배열에 의해 붙었던 계면은 다시 냉각되면서 기판의 휘어짐 현상에 의해 가운데 부분은 사이가 뜨고 모서리 부분만 약하게 접합이 이루어져서 결합력이 0.1 N이하로 나타났다. 그림 9를 통해 InP 기판 표면에 생긴 많은 홈과 $Si_3N_4$/Si 표면에는 In 원자가 dot 형태로 모서리에 붙어있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 최소화하기 위해서는 열처리 온도를 최대한 낮추고 높은 압력을 인가하며 기판을 lapping하여 두께를 줄여야 할 것으로 생각된다.

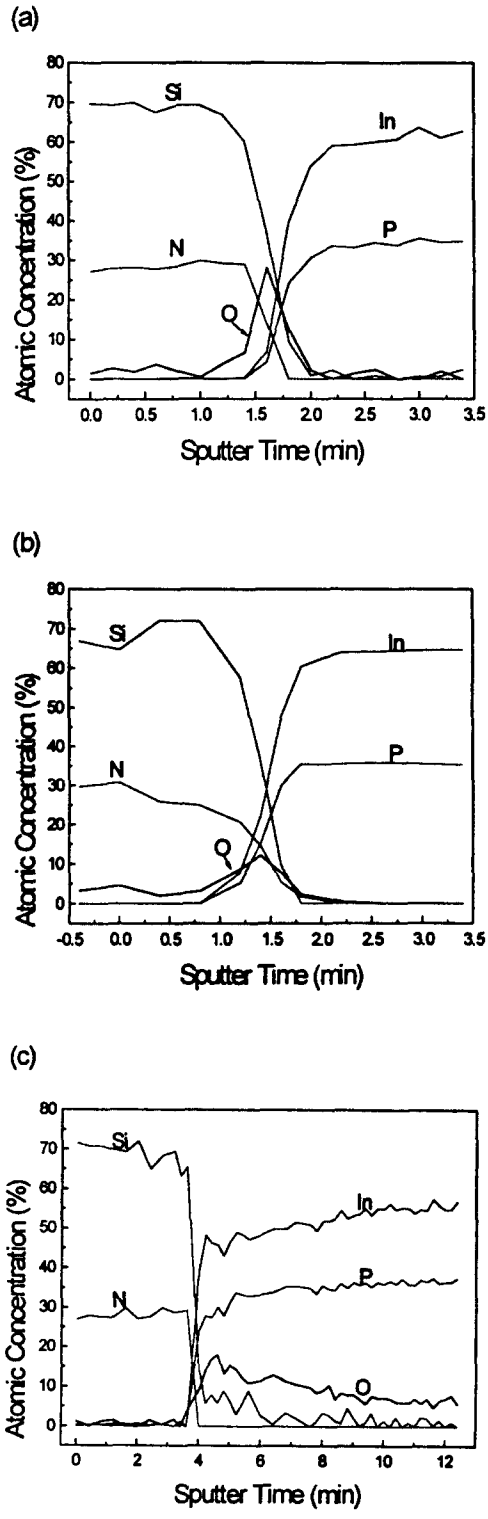


Fig. 11. AES depth profiles of direct wafer bonding interfaces. (sputter rate 220 Å/min $SiO_2$) (a) $H_2$ 50 sccm, 680℃ (b) $H_2$ 100 sccm, 680℃ (c) $N_2$ 50 sccm 680℃

이와 같은 모서리 영역만의 결합상태는 두 시편이 접합된 상태에서의 SAT 측정으로도 확인할 수 있었다.[21] 그림 10에서 보듯이 InP-$Si_3N_4$/InP 계면 (a)의 경우 시편 전체에서 균일한 접합이 이루어졌으나 InP-$Si_3N_4$/Si 계면 (b)의 경우 모서리에만 불균일하게 접합이 이루어진 것을 알 수

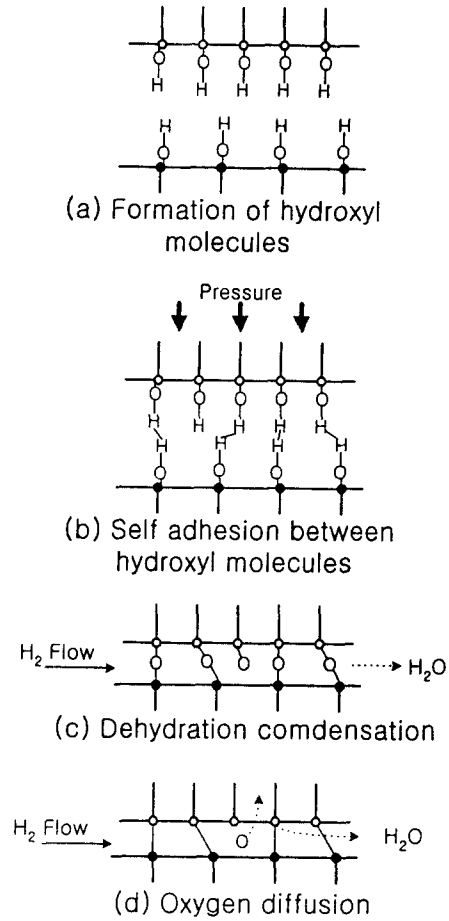


Fig. 12. A model of the direct wafer bonding process.

있었다.

direct wafer bonding 계면에서의 원소 분석을 위해 AES 깊이 분석을 하였다. 그림 11 (a)에서는 고순도 수소 (99.999%)를 50 sccm, 그림 11 (b)에서는 100 sccm, 그림 11 (c)에서는 질소 (98%)를 50 sccm 흘려주면서 열처리한 결과이다. 모두 계면에서 산소가 나타났으나 수소의 양을 증가시킴에 따라 이 양이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

이것은 이전에 보고된 direct wafer bonding 메카니즘과 잘 부합하는 결과이다. Sakai[11]와 Wada[23]는 GaAs-InP, Tong[22]은 Si-Si direct wafer bonding에서 그림 12와 같은 방식에 의해 접합이 이루어진다고 보고하였다. 즉 표면 에칭과정을 통해 hydroxyl 분자가 형성되어 이들간의 수소 결합으로 상온에서 self adhesion이 일어나고 수소 분위기에서 열처리 과정을 거치면서 탈수소화 반응에 의해 GaAs-O-InP, Si-O-Si 결합이 형성된다고 보았다. 계면에 남은 산소 원자는 수소의 흐름에 따라 $H_2O$를 형성하여 계면으로 빠져나가거나 또는 기판 내부로 확산된다고 하였다. 따라서 수소의 양을 증가시킴에 따라 계면의 산소 원자가 $H_2O$를 형성하여 계면을 빠져나가는 양이 늘어나서 그림 11와 같은 결과를 보인 것으로 생각된다.

그림 11 (c)는 질소 분위기에서 direct wafer bonding을 실시했을 때의 결과이다. 계면에서 검출되기 시작한 산

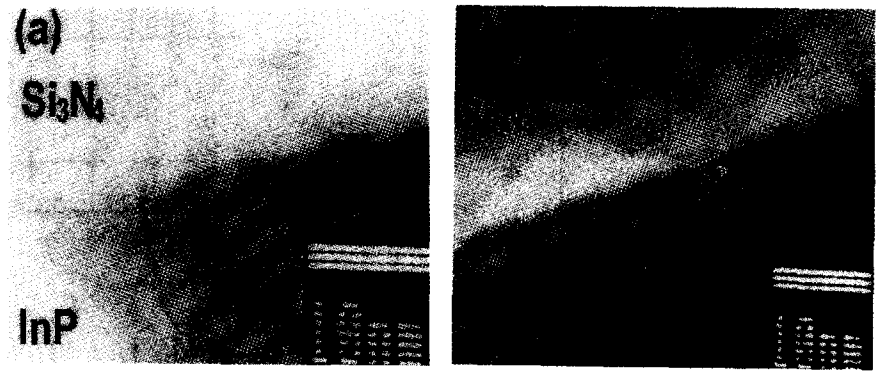


Fig. 13. Cross-sectional TEM images of PECVD and direct wafer bonding interfaces (a) $Si_3N_4$ /InP interface. (b) direct wafer bonding interface.

소는 InP 기판 영역에서도 검출되고 Si 또한 계속해서 적은 양이지만 검출되는 것을 볼 수 있다. 이것은 순도가 낮은 질소 가스에 포함된 산소에 의해 열처리시 계면에서 산화 반응이 일어나 $In_2O_3$, $SiO_2$ 등이 형성되어 나타난 결과로 보인다. 이 경우 결합력은 0.1 N이하로 낮았다. 그림 13은 PECVD로 $Si_3N_4$를 InP 기판 위에 성장시켰을 때의 계면과 direct wafer bonding 계면의 TEM 사진이다. 부분적으로 기판의 요철에 의해 생긴 void가 관찰되기도 했으나 전체적으로는 $Si_3N_4$/InP 계면과 비교해서 비정질 상태인 $Si_3N_4$와 InP 기판간에 좋은 계면 상태를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 InP 기판과 $Si_3N_4$/InP의 direct wafer bonding에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. InP 기판을 50% HF로 에칭하였을 때 RMS roughness가 1.54 Å, 접촉각은 5°였으며 농도가 높아질수록 거칠기가 감소하고 접촉각은 낮아졌다. 이 시편을 $Si_3N_4$/InP를 $NH_4OH$로 에칭한 시편과 상온에서 접촉시켰을 때 InP-OH···(HOH)···HO-$Si_3N_4$ 수소 결합에 의한 self adhesion을 관찰할 수 있었다. 열처리 온도가 높을수록, HF 농도가 높을수록, 냉각 속도가 낮을수록 결합력이 높았다. 수소 분위기에서 680℃로 열처리한 경우 최고 38.7 N의 결합력을 나타내었으며 질소 분위기에서 열처리한 경우는 붙지 않거나 0.1 N이하의 낮은 결합력을 나타내었다. PECVD 방법으로 성장시킨 $Si_3N_4$가 direct wafer bonding 계면으로 전이되는 결과에 비추어 충분한 신뢰성을 갖는 접합을 이루고 있는 것으로 생각되며 이후의 소자 공정에 이용될 수 있을 것이다. AFM과 TEM을 통해서 In 원자의 이동현상으로 원자 재배열이 일어나는 것을 확인하였으며 수소의 유량을 증가시킴에 따라 계면 산소의 유량이 줄어드는 AES 분석을 통해 탈수소화 반응과 산소 확산을 통해 접합이 이루어짐을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대 신소재 박막가공 및 결정성장 연구센터를 통한 한국과학재단의 지원금으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Z. H. Zhu, Felix E. Ejeckam, Y. Qian, Jizhi Zhang, Zhenjun Zhang, Gina L. Christenson, and Y. H. Lo, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., **3** (3), 927 (1997)
2. A. Black, A. R. Hawkins, N. M. Margalit, D. I. Babic, A. L. Holmes, Jr., Y. L. Chang, P. Abraham, and E. L. Hu, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., **3** (3), 943 (1997)
3. Winston K. Chan, Alfredo Yi-Yan, and Thomas J. Gmitter, IEEE J. Quantum Electron., **27** (3), 717 (1991)
4. R. Venkatasubramanian, M. L. Timmons, T. P. Humphreys, B. M. Keyes, and R. K. Ahrenkiel, Appl. Phys. Lett., **60** (7), 886 (1992)
5. Z. L. Liau and D. E. Mull, Appl. Phys. Lett., **56** (8), 737 (1990)
6. Q. Y. Tong, U. Gosele, C. Yuan, A. J. Steckl, and M. Reiche, J. Electrochem. Soc., **142** (1), 232 (1995)
7. Y. H. Lo, R. Bhat, D. M. Hwang, C. Chua, and C. H. Lin, Appl. Phys. Lett., **62** (10), 1038 (1993)
8. Hiroshi Wada and Takeshi Kamijoh, Jpn. J. Appl. Phys., **33** (part 1, 9A), 4878 (1994)
9. Y. Ohiso, C. Amano, Y. Itoh, K. Tateno, T. Tadokoro, H. Takenouchi, and T. Kurokawa, Electron. Lett., **32** (16), 1483 (1996)
10. B. F. Levine, A. R. Hawkins, S. Hiu, B. J. Tseng, J. P. Reilley, C. A. King, L. A. Gruezke, R. W. Johnson, D. R. Zolnowski, and J. E. Bowers, Appl. Phys. Lett., **71** (11), 1507 (1997)
11. Takayuki Sakai and Kazuhiko Shimomura, Jpn. J. Appl. Phys. **36** (part 1, 3B), 1481 (1997)

12. Yae Okuno, Appl. Phys. Lett., **68**(20), 2855 (1996)
13. J. B. Lasky, Appl. Phys. Lett., **48**(1), 78 (1986)
14. B. H. Lee, G. J. Bae, K. W. Lee, G. Cha, W. D. Kim, S. I. Lee, T. Barge, A. J. Auberton Herve, and J. M. Lamure, Pro. IEEE Int. SOI Conf. 114 (1996)
15. Hiroshi WaDa, Yoh Ogawa, and Takeshi Kamijoh, IEEE Photon. Technol. Lett., **6**(12), 1403 (1994)
16. Hideki Yokoi and Tetsuya Mizumoto, Jpn. J. Appl. Phys. **36**(part 1, 12A), 7230 (1997)
17. Brian E. Roberds and Shari N. Farrens, J. Electrochem. Soc., **143**(7), 2365 (1996)
18. Karin Ljungberg, Ylva Backlund, Anders Soderbarg, Mats Bergh, Mats O. Andersson, and Stefan Bengtsson, J. Electrochem. Soc., **142**(4), 1297 (1995)
19. Jin-Goo Park and Spini Raghavan, *Contact Angle, Wettability and Adhesion,* K. L. Mittal (Ed.), © VSP, 421 (1993)
20. D. Li, C. NG, and A. W. Neumann, *Contact Angle, Wettability and Adhesion,* K. L. Mittal (Ed.), © VSP, 311 (1993)
21. Rex T. Gaviol and Rodrigo O. Amor, Advances in Electronic Packaging, EEP-Vol. 19-1, 221 (1997)
22. Q. Y. Tong, T. H. Lee, U. Gosele, M. Reiche, J. Ramm, and E. Beck, J. Electrochem. Soc., **144**(1), 384 (1997)
23. Hiroshi Wada, Yoh Ogawa, and Takeshi Kamijoh, Appl. Phys. Lett. **62**(7), 738 (1993)