

## 다양한 흡착자에 의한 Si(113)3×2 표면의 상변화 연구

김학수 · 황찬국 · 김용기 · 김정선 · 박종윤 · 김기정\* · 강태희\* · 김봉수\*

성균관대학교 물리학과, \*포항가속기 연구소  
(1999년 2월 5일 접수)

### Adsorbate-induced reconstructions of Si(113)3×2 surface

Hak-Su Kim, Chan-Cuk Hwang, Yong-Ki Kim, Jeong-Seon Kim, Chong-Yun Park,  
Ki-Jeong Kim\*, Tae-Hee Kang\* and Boong-Soo Kim\*

Dept. of Physics, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746

\*Pohang Light Source, Pohang Accelerator Laboratory, Pohang, 790-784

(Received February 5, 1999)

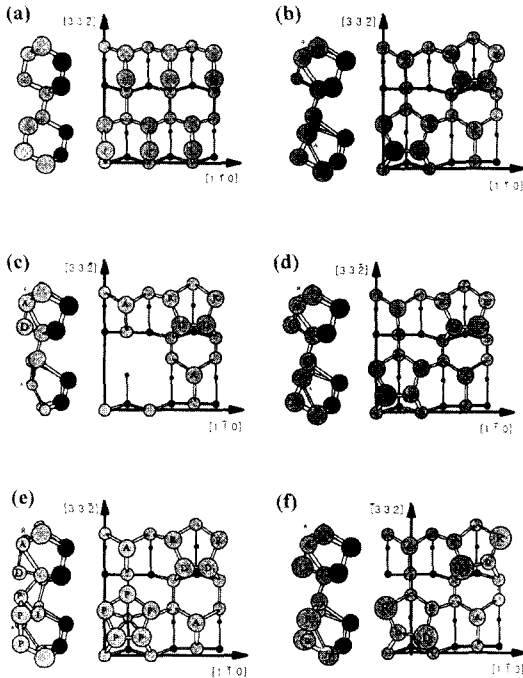
**요 약** - 전자회절법을 이용하여 K 및 다양한 흡착자에 의한 Si(113)3×2 표면의 상변화를 관찰하였으며 광전자분광법을 이용하여 산소 노출량에 따른 가전자대 및 내각준위스펙트럼을 관찰하였다. 산소 흡착에 의해 가전자대의 표면상태가 내각준위에서 관찰되는 두 피크(S1, S2)와 동시에 사라지면서 3×1 주기성을 보였다. 특히 이러한 변화가 동종물질인 실리콘 증착에서도 관찰되었으며 후열처리에 의해 3×2 주기성으로 환원되는 것으로 미루어 Si(113)3×2 표면의 3×1으로의 초기 상전이가 실리콘 표면의 흡착자에 의해서 형성된 것이 아니며 기판 자체의 재배열과 관련되어 있음을 확인하였다.

**Abstract** - The phase transition on the surface which several adsorbates (K, Mg, etc.) are deposited was observed by Low Energy Electron Diffraction (LEED) and Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED). We took the photoelectron spectra from the valence and core level at several oxygen exposure. For oxygen adsorption, the surface state in valence spectra diminished concurrently with S1, S2 peaks in core level spectra and surface periodicity turned to 3×1. Especially even on the Si-deposited surface the same result was observed. The surface is recovered to 3×2 by post-annealing. These results suggest that the phase transition from 3×2 to 3×1 on the Si(113) at initial stage is induced by a rearrangement of atoms on the substrate, not by the formation of overlayer.

### 1. 서 론

반도체 산업의 기술적 발전과 관련하여 반도체상의 이종적층성장(heteroepitaxy)은 많은 연구의 대상이 되어왔다. 특히 광전자공학 및 고속실리콘소자에 응용을 위해 실리콘 위에 Ge, GaAs 등을 적층성장시키는 것은 반도체 산업의 주된 관심사이다. 그러나 실리콘 기판의 원자구조에 대한 이해 없이 초기 적층성장을 이해한다는 것은 어려운 일이다. 지금까지 반도체 표면에 대한 학문적, 상업적 연구는 주로 (100), (111) 표면 등 low miller index 표면에 대해 이루어져 왔다. 특히 다른 표면으로의 재배열 즉, faceting이 일어난다고 알려진

high miller index 표면에 대한 연구는 아직 미미한 상태이다. 그러나 이중 Si(113) 표면의 경우에는 열적으로 안정되며[1, 2] 특히 기존에 연구된 (100), (111)의 특성이 공존하는 것으로 보고되어[3] 또 다른 적층성장용 기판으로서 가능성이 있다. 즉 그림 1(a)에 제시된 바와 같이 이상적으로 단절된 Si(113) 표면의 1×1 단위포는 두 종류의 표면원자를 가진다. 한 종류는 2개의 dangling bond를 가지는 (100)방향의 특성을 갖는 원자이며 다른 하나는 1개의 dangling bond를 가지는 (111) 방향의 특성을 갖는다. 또한 Si(100), Si(111) 표면과 마찬가지로 단절된 Si(113) 표면 역시 표면에너지를 낮추기 위해 재배열되며 상온에서 3×2 구조로 재배열됨



**Fig. 1.** (a) Bulk-terminated surface, (b) Ranke's 3×1 model-"dimer-and-adatom" model[4], (c) Ranke's surface void model [4], (d) Jacobi's asymmetric dimer model [5], (e) Dabrowski's interstitial model [6], (f) Wang's puckering model [7].

로써 에너지적으로 가장 안정된 구조를 갖는다고 알려져 있다. 실험적으로 흥미 있는 사실은 이종물질을 흡착시키거나 고온의 기판온도(약 450°C)에서 3×2 표면이 3×1 표면으로 쉽게 재배열된다는 것이다. 현재까지 여러 가지 실험 및 이론 결과를 바탕으로 3×2, 3×1간의 상전이에 대한 다양한 모델(Fig. 1)이 제안되어 왔으나 아직까지 그 상전이 메커니즘은 명확하게 밝혀지지 않았다. Si(100)나 Si(111) 표면 위에 이종물질을 소량 흡착시켰을 경우 1가 원자는 최상위 원자 위에(on-top site) 흡착되는 반면 산소원자는 Si-Si 간의 결합을 깨고 그 사이에 흡착되며 잘 배열된 상부구조를 만들지는 않는 것으로 알려져 있다. 이렇게 흡착특성이 다른 다양한 이종물질이 흡착된 Si(113) 표면의 상변화를 관측함으로써 3×2, 3×1 간의 상변화에 대한 정보를 얻고자 하였다. 본 연구에서는 전자회절법을 이용하여 이종 물질의 흡착량과 기판온도에 따른 상변화를 관측하였다. 그리고 산소 흡착량에 따른 LEED, Si 2p 내각준위, 가전자 스펙트럼의 변화를 동시에 관찰하였다. 이러한 결과

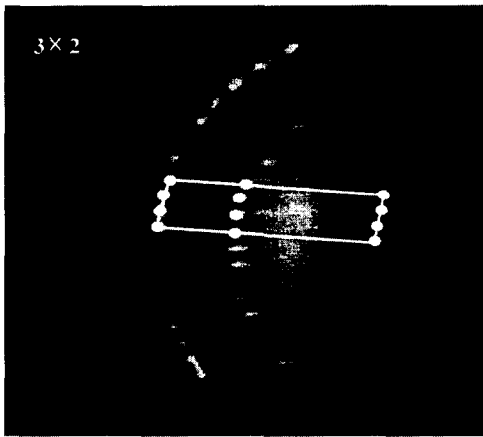
들을 바탕으로 Si(113)3×1, 3×2간의 상전이 특성에 대해 논하고자 한다.

## 2. 실험 및 결과

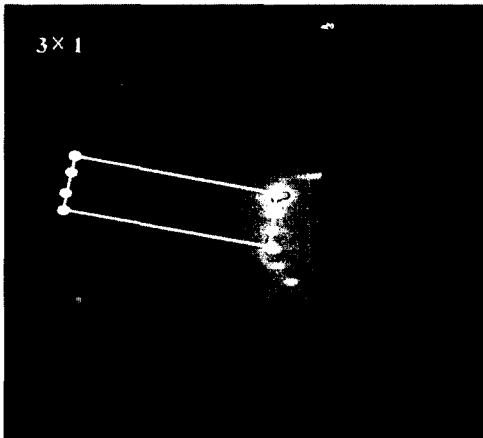
Potassium 증착실험은 반사고에너지전자회절법(RHEED)과 XPS가 장착된 본 연구실의 초고진공 용기에서, 산화실험은 LEED 및 질량분석기가 장착된 포항 가속기연구소(PLS)의 Beamline 2B1에서 각각 수행되었다. 초고진공 용기는 각각 130°C로 40시간 정도 열처리했으며 연구실용기의 기본진공도는  $1.0 \times 10^{-10}$  Torr, Potassium 증착시  $4.5 \times 10^{-10}$  Torr였고 Beamline의 초고진공 용기는 기본진공도  $3.0 \times 10^{-10}$  Torr, 산소 노출시  $1.0 \times 10^{-8}$  Torr를 유지했다. Potassium은 SAES getters Inc.에서 제작한 막대형 증착원을 사용하였고 통전기열 방식을 이용하여 가열했다. 증착원과 시료와의 거리는 7 cm였으며 5A에서 10분간 수차례 달기체화했다. 산화실험은 초고진공 용기에 연결된 누설밸브(leak valve)를 통해 고순도의 산소가스(99.99%)를 불어넣는 방법을 이용하였다. 시료는 면방향이 잘 정의되고 경면처리된 n형 Si(113) 웨이퍼를  $7 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 의 크기로 잘라, Shiraki 방법[8]으로 화학적 식각을 하여 용기 내에 장치하였으며 온도는 '광 고온계'로 측정하였다. 깨끗한 Si(113)3×2 표면은 웨이퍼를 통전기열하여 약 800°C로 8시간 정도 예열한 후, 약 1200°C로 수차례 순간가열하여 얻었으며 RHEED상이 3×2 주기성을 나타냄을 확인하였다(Fig. 2(a)). 이 때 ×2 회절점은 3×1 주기성에 의한 회절점에 비해 약하며 줄무늬 형태였다. 이는 3×2 LEED 상에서 ×2 회절점이 약하고 퍼지는 것과 동일한 특성인 것으로 생각된다. 또한 ×2 줄무늬 내에 예리한 회절점이 겹쳐 보이지 않는 것으로 보아 3×2 표면은 넓은 두 개의 영역 즉, 3×2와 3×1이 공존하는 표면은 아니라고 여겨진다.

### 2.1. K/Si(113) 표면에서의 상변화 연구

상온에서 K를 증착시켰을 때는 초기에 3×2 표면이 3×1으로 상변화되는 것이 관측되었으며(Fig. 2(b)) 그 이상의 K 증착에 있어서는 상변화가 관측되지 않았다. 200°C 이상에서는, 초기 증착에 3×1으로 상변화한 후 연속적으로 1×2가 섞여 나타났으며 증착량의 증가에 따라 약한 2× 회절형태가 나타났다. 250~300°C의 구간에서는 역시 초기 3×1으로의 상변화를 거쳐 3×1+1×



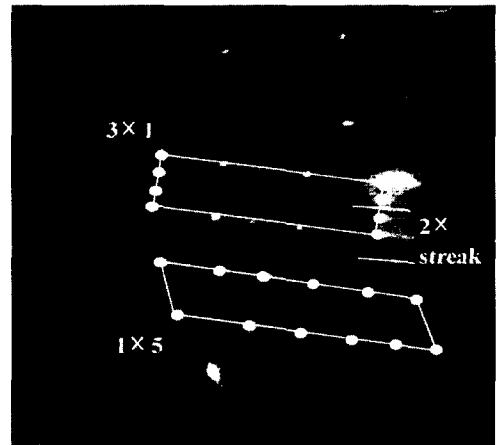
(a)



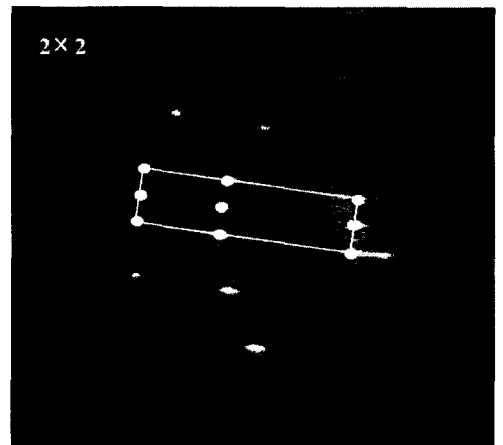
(b)

**Fig. 2.** RHEED images of K/Si(113) surface-(a) 3×2 pattern from clean surface, (b) 3×1 pattern from K-deposited surface.

5+2×의 회절형태를 가지며(Fig. 3(a)) 증착량을 증가시키면 따라 3×1, 1×5 순으로 회절양상이 사라지고 최종적으로 2× 줄무늬가 2×2상으로 발전했다(Fig. 3(b)). 정리하면 200°C에서는 3×1 주기성에 1×2 줄무늬가 강화되다가 약한 2×가 관찰되었으며 250°C와 300°C의 기판온도에서는 초기 흡착시 1×5 주기성이 형성되며 점차 2×2상으로 변화한다. 한편 350°C에서는 K의 flux에 따라 다른 RHEED상이 관찰되었다. 즉 K flux가 작을 때(증착원에 흐르는 전류=5.5 A) 3×1상이, K flux가 클 때(6 A) 3×1+1×5+2×상이 관찰되었다. 400°C에서는 증착량에 관계없이 3×1 주기성이 관측되었다. Si(113) 청정 표면에 K 증착시간과 기판온도에 따



(a)



(b)

**Fig. 3.** RHEED images of K/Si(113) surface at annealing temperature 200~300°C-(a) 3×1+1×5+2× pattern, (b) 2×2 pattern from K-deposited surface.

른 상도표를 표시하였다(Fig. 4). Na/Si(113)3×2계에 대한 황찬국 등의 보고[10]에 따르면, Na이 흡착되는 경우 초기에 c6×4가 형성되는 구간이 존재하는 특징을 가지고 있으며 그 이상의 흡착에서는 3×1 이외의 변화는 관측되지 않았다. 기판온도 300°C에서는 초기 3×1이 1×3+2×로 연속적으로 변화한다. 이 경향은 상온 초기 흡착에서 관찰되는 c6×4를 제외하면 역시 1가 원자인 Li의 흡착과 유사한 경향성을 가진다. 또한 Cs/Si(113)3×2계에 대한 안기석 등의 보고[11]에 따르면, Cs이 흡착되는 경우는 온도구간에 따라 다소 복잡한 양상을 나타내는데 역시 상온 초기 흡착에서는 3×2 표면이 3×

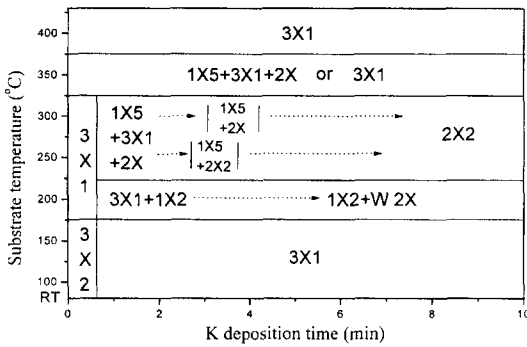


Fig. 4. The phase diagram of K/Si(13) surface at each substrate temperature and deposition time~dot : continuous change, W: weak, +: mixing phase.

1.0으로 변화했으며 200°C 영역에서는 3×1이 2×2와의 혼합상을 거쳐 줄무늬진 2×2로 변화하였다. 300~400°C 구간에서는 초기의 3×1 표면이 순차적으로 1×5, 2×2가 강한 혼합상을 거쳐 선명한 2×2로 변화하였다. 이는 K의 경향과 아주 흡사하다. 또한 Mg/Si(113) 3×2계에 대해서도 상온 초기 흡착시 3×1으로의 전이가 관찰되었으며 특정 덮임률에서 250°C를 경계로 저온에서는 1×1, 고온에서는 c(2×4)가 관찰되었다(Fig. 5). 또한 Y. Fujisaku et al.의 Al, Ga의 흡착에 있어서도 상온 초기 흡착시 3×1 phase가 형성됨이 관찰되었다. 이러한 일련의 흡착실험을 통해 알 수 있었던 것은 첫째,

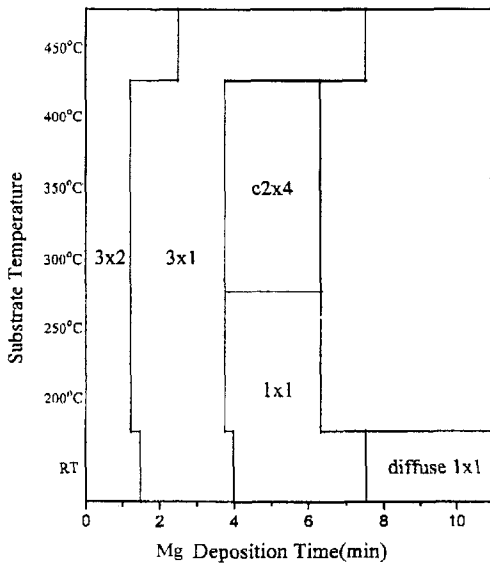


Fig. 5. The phase diagram of Mg/Si(113) surface at successive substrate temperature and deposition time.

기판온도가 상온일 경우 Li, Cs, K, Mg, 추후에 기술할 실리콘 및 Al, Ga 등의 흡착자가 3×2 표면을 3×1으로 상변화시켰다. 둘째, 각 흡착자의 상변이 경향을 보면 Li과 Na, K과 Cs이 유사한 경향성을 보임을 알 수 있었다. 특히 이러한 상온 초기 흡착의 경향성은 흥미로운 사실이다. 그러나 실험에서 도입한 흡착자들이 실리콘 표면에서 다양한 상부구조를 만드는 것이 많이 관측, 보고되어 온 것 또한 사실이다. 따라서 이러한 초기 상변화가 실리콘 기판에 그 원인을 둔 것인지 아니면 수많은 보고처럼 동일한 상부구조를 만드는 것인지는 명확하지 않다.

2.2. O/Si(113) 표면의 XPS 연구

청정 표면에 대해서는 LEED를 통해 3×2 주기성을 관찰할 수 있었다. 이 결과는 기존의 보고와 일치하며 또한 표면구조의 변화에 민감한 가전자대 스펙트럼의 비교를 통해서도 확인할 수 있었다. 1가 원자의 흡착과 같이 3×2 주기성은 21L의 산소 노출량에 의해 3×1으로 변화했으며 노출량이 증가함에 따라 1×1 주기성으로 진행하였다. Fig. 6에 나타난 가전자대 스펙트럼은 기존의 보고와의 비교에 용이하게 광자에너지 hv=21.2 eV, 표면법선방향에서 측정되었으며 이때 산소 노출량

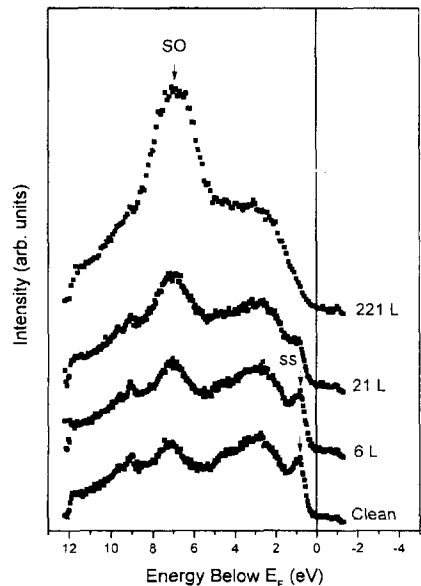


Fig. 6. Successive valence spectra as increasing oxygen exposure. The feature SO is assigned as non-bonding O 2p (P.e. = 21.2 ev, normal emission).

은 각각 6, 21, 221L였고 모두 상온에서 이루어졌다. 3×2 청정표면에 대해  $E_F$ 로부터 0.78 eV 아래에서 peak 이 관찰되었으며 입사광의 에너지에 무관하게 동일위치에서 관찰되므로 ‘표면상태’로 여겨진다. 이는 기존의 각분해자외선분광법(AUPS)[3]과 CITS(Conductance Image Tunneling Spectroscopy)[14] 실험을 통해서도 확인되었다. Myler 등의 보고[3]에 따르면 이 ‘상태’는 수소화 반응에 의해 억제되므로 Si(113)3×2 표면의 dangling bond에 기인하는 것으로 생각된다. 이 경우 분자상태로 흡착된 산소의 가능성을 배제할 수 없는데 만일 표면에 분자상태의 산소가 존재한다면 5 eV 근방에서 산소의 2 $\pi$  반결합상태에 의한 봉우리가 관찰되어야 한다[14]. 그러나 이런 봉우리는 관찰되지 않았다. 이 3×2 구조가 산소에 노출됨에 따라 약 7.2 eV에서 SO라고 표시된 봉우리가 나타나면서 이 ‘상태’는 감소한다. 이 SO 봉우리는 이미 원자상태로 Si와 결합한 산소의 2p 궤도로 생각되고 있다[14]. 따라서 상온에서 산소는 원자상태로 Si(113)3×2 표면에 흡착된다고 여겨진다. Fig. 7은 청정 표면 및 산소 노출량이 다른 표면의 Si 2p 표면내각준위 스펙트럼을 나타내고 있다. 이 때 광자 에너지는 124 eV를 선택했으며 표면법선방향에서 측정되었다. 기존의 보고와 같이 Si(113)3×2 표면에 대해, 벌크 봉우리에 대해서 각각 대칭적인 결합에너지 위치에 두 개의 shoulder (S1, S2)가 관찰되었다. 이를 청정 표면의 스펙트럼과 비교하면 몇 가지 변화가 보인다. 우선 S1과 S2는 21L 노출량까지 동시에 감소하다가 221L 노출량에서 완전히 사라진다. 앞서 제시한 가전자대 스펙트럼에서의 dangling bond ‘상태’와 비교하면 S1, S2 역시 dangling bond를 갖는 원자로부터 기인된 것 이라고 할 수 있다. 221L 노출량일 때 결합에너지 101.3 eV 근방에서 다른 shoulder가 관찰되었다. 벌크 봉우리에 대한 상대적인 에너지 차이는 1.75 eV로서 이는 O/Si(111)7×7에 대한 기존의 보고에 의하면 Si 원자에 두 개의 산소원자가 결합된 Si<sup>2+</sup> 상태에 의한 봉우리이다. [16] 6L와 21L 노출량 사이에는 두 가지의 주목할만한 변화가 보인다. 첫째로, S1, S2는 동시에 감소했다. 둘째, 산소는 노출량이 증가함에 따라 순차적으로 Si<sup>+</sup> → Si<sup>2+</sup> 형태가 지배적으로 흡착된다. 이는 Si(111)7×7의 경우와 유사하다[15]. 위의 실험결과를 통해 알수 있었던 것은 다음과 같다. 첫째, 언급된 흡착자들은 비록 화학적 특성이 다르지만 유사한 상변화를 일으켰으며 특히 특정한 상부구조를 만들지 않는다고 알려진 산화과

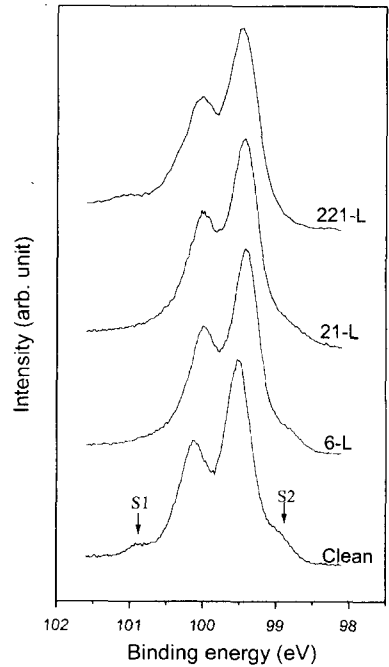


Fig. 7. successive surface sensitive Si 2p spectra taken as increasing oxygen exposure (P.E. = 124 eV, normal emission).

정에 있어서도 초기 흡착시에 3×2 표면이 3×1으로 상변화가 관찰되는 것으로 미루어 이는 ‘상부구조의 형성’에 의한 것이 아니다. 둘째, 이러한 상변화에 의해 두 가지 변화가 있었다. 내각준위 Si 2p 스펙트럼에 있어서 S1, S2와 가전자대 스펙트럼의 ‘표면상태’가 동시에 사라졌다. 이는 산소원자의 흡착에 의한 3×1로의 상변화가 dangling bond를 가진 실리콘 원자의 재배열에 그 원인이 있음을 보여준다. 셋째, 다른 실리콘 표면과 마찬가지로 표면의 흡착은 Si<sup>+</sup> → Si<sup>2+</sup>의 순서로 이루어짐을 알수 있었다. 이제까지의 연구를 통해 초기 상온 흡착에 의한 Si(113) 3×2 표면의 상변화가 특정한 상부구조에 의한 것은 아니리라고 생각할 수 있다. 그래서 흡착자에 의한 상온 초기 3×1 구조의 특성을 알아보고자 동종 물질인 실리콘을 증착하여 초기 흡착에 의한 3×1 구조가 열처리에 따라 어떻게 변화하는지 연구하였다.

### 2.3. Si/Si(113) 표면의 XPS 연구

황찬국 등과 공동 수행한 연구결과[16]에 따르면 실리콘을 상온에서 Si(113) 청정표면에 증착시키면 증착 시간에 따라 퍼진 3×1 및 1×1 주기성으로 발전하는데

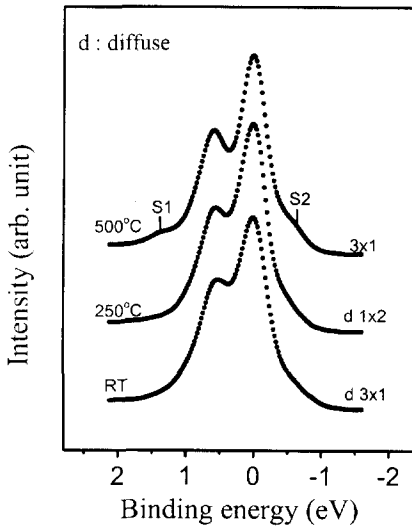


Fig. 8. Surface sensitive Si 2p spectra at each annealing temperature taken from the Si-deposited Si(113) surface.

LEED상에서의 퍼진 상은 이 주기성이 'disorder structure'임을 의미한다. 또한 이때 Si 2p 내각준위스펙트럼의 변화는 Fig. 7의 산화실험결과와 마찬가지로 S1, S2가 감소하는 경향을 보인다. Fig. 8은 상온에서 실리콘을 증착했을 때 퍼진 3×1 주기성을 가진 표면에 대해 기판온도를 높이면서 Si 2p 표면 내각준위 스펙트럼을 측정하는 결과이다. 250°C로 1분간 가열하였을 때 역시 퍼진 1×2 표면을 얻을 수 있었고 이때의 스펙트럼은 커다란 변화를 보이지 않았다. 그러나 500°C 이상으로 열처리하여 얻은 선명한 3×1 주기성으로부터 얻은 스펙트럼은 청정 3×2 주기성으로부터의 스펙트럼에서처럼 S1, S2가 관측되었다. 이는 두 표면이 다른 메커니즘에 의해 3×1 주기성을 가지는 것을 의미한다. 우선 후속 열처리에 의해 얻은 3×1 표면이 'ordered structure'를 가진다면 상대적으로 초기 퍼진 3×1 표면은 'disordered structure'라고 생각할 수 있다. 황찬국 등이 보고한 바[17]와 같이 Si(113) 3×1 표면으로부터의 스펙트럼에서 나타나는 S1, S2가 Ranke의 dimer-and-atom 모델[Fig. 1(b)]에 있어서 R, D간의 전하 이동에 의한 것이라면 흡착자의 초기 상온 흡착에 의한 퍼진 3×1 주기성은 이러한 전하 이동과 그에 수반한 재배열 구조가 해소된 구조라고 생각할 수 있다. 따라서 흡착자의 흡착이 이러한 전하 이동에 의한 구조 형성의 원인을 제거한다고 생각할 수 있으나 이를 확인하기 위해서는

Si(113) 3×2 청정 표면의 구조에 대한 연구가 우선해야 한다. 또한 다양한 화학적 특성을 갖는 흡착자에 대해 공통으로 나타나는 3×1으로의 상변화와 특정한 상부구조를 만들지 않는 산소 흡착에 의해서도 동일한 상변화가 나타나는 것으로 보아 '기판 재배열'의 가능성이 있다. 그러나 이러한 가능성의 제시를 다양한 사례 연구를 통해서만 밝혀낼 수는 없다. 따라서 LEED I-V 혹은 STM과 같이 구조에 민감한 tool을 통해 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 3. 결 론

Alkali metal인 Potassium을 다양한 기판온도와 증착시간에 따라 흡착시키면서 RHEED를 관측하였다. 결과 상온에서는 3×1으로의 상변화가 관측되었다. 200°C에서는 3×1 주기성에 줄무늬 형태의 1×2 회절점이 강화되다가 약한 2×가 관찰되었으며 250°C와 300°C의 기판온도에서는 초기 흡착시 1×5 주기성이 형성되며 점차 2×2상으로 변화하였다. 이는 Cs/Si(113)계의 경향성과 유사하다. 또한 Si(113)3×2 청정 표면의 상온 산화과정을 연구한 결과, 초기에 3×2→3×1 상변화가 관측되었다. 이는 산화의 일반적 특성과 비교해볼 때 이런 상변화가 흡착자가 실리콘 표면에 만드는 상부구조에 의한 것이 아님을 알 수 있었다. 또한 3×2 표면이 산소에 노출되었을 때 노출량 증가에 따라 내각준위 스펙트럼의 S1, S2와 가전자대 스펙트럼의 SS가 3×1으로의 전이와 더불어 감소하였으며 같이 사라짐을 관찰하였다. 또한 실리콘의 상온 증착에서도 역시 퍼진 3×1 phase가 관찰되었는데 이는 'disorder phase'로 여겨지며 후속 열처리에 의한 3×1과는 다른 상이다. 이는 두 상의 내각준위 스펙트럼을 비교함으로써 알 수 있었다. 다양한 화학적 특성을 갖는 흡착자에 대해 유사한 상변화가 나타나는 것으로 보아 상온 초기 흡착에 따른 3×1으로의 상변화는 '기판 재배열'에 의한 현상일 가능성이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 연세대학교 초미세표면연구센터(ASSRC)를 통한 한국과학기술재단(KOSEF) 및 교육부 기초과학지원연구프로그램(No. BSRI-2445)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] P. Soukiassian and H. I. Starnberg, *Physics and Chemistry of Alkali Metal Adsorption*, eds. H. P. Bonze, A. M. Bradshaw and G. Ertl (Elsevier, Amsterdam, 1989).
- [2] B. Z. Olshanetsky and V. I. Mashanov, *Surf. Sci.* 111 (1981) 414.
- [3] U. Myler and K. Jacobi, *Surf. Sci.* 220 (1989) 353.
- [4] W. Ranke, *Phys. Rev. B* 41 (1990) 5243.
- [5] K. Jacobi and U. Myler, *Surf. Sci.* 284 (1993) 223.
- [6] J. Dabrowski, H.-J. Müssig and G. Wolff, *Phys. Rev. Lett.* 73 (1994) 1660.
- [7] J. Wang, A. P. Horsfield, D. G. Pettifor and M. C. Payne, *Phys. Rev. B* 54 (1996) 13744.
- [8] A. Ishizaka and Y. Shiraki, *J. Electrochem. Soc.* 33 (1986) 666.
- [9] U. Myler, P. Althanz and K. Jacobi, *Surf. Sci.* 251/252 (1991) 607.
- [10] C. C. Hwang, K. S. An, R. J. Park, J. B. Lee, J. S. Kim, C. Y. Park, S. B. Lee, A. Kimura and A. Kakizaki, *Jour. Kor. Phys. Soc.* 30,2 (1997) 341.
- [11] K. S. An, C. C. Hwang, R. J. Park, J. B. Lee, J. S. Kim, C. Y. Park, S. B. Lee, A. Kimura and A. Kakizaki, *Jap. Jour. Appl. Phys. Part 1.* 5A (1997) 2833.
- [12] S. M. Scholtz, K. Jacobi, *Surf. Sci.* 369 (1996) 117.
- [13] J. Knall, J. B. Pethica, J. D. Todd and J. H. Wilson : *Phys. Rev. Lett.*, 66,13 (1991) 1733.
- [14] U. Höfer, P. Morgan, W. Wurth and E. Umbach, *Phys. Rev. B* 40,2 (1989) 1130.
- [15] W. Mönch, "Semiconductor Surfaces and Interfaces", Springer-Verlag, 1993 pp. 284-286.
- [16] C. C. Hwang, H. S. Kim, Y. K. Kim, J. S. Kim, C. Y. Park, K. J. Kim, T.-H. Kang and B. Kim, submitted to PRB