

## RHEED회절점의 강도변화에 따른 In/Si(111)에 대한 연구

곽호원 · 이의완 · 박동수 · \*이운환

경북대학교 자연과학대학 물리학과, \*대구교육대학교  
(1997년 2월 19일 접수)

### The study of In/Si(111) surface by variation of RHEED spot intensity

Ho-Weon Kwak, Eui-wan Lee, Tong-Soo Park and Woon-Hwan Lee\*

Department of Physics, Kyung Pook National University, Taegu 702-701, Korea  
\*Taegu National Teachers College, Taegu 705-715  
(Received February 19, 1997)

**요 약** - Si(111)  $7 \times 7$ 표면에 In을 증착시킬 때 기판온도와 증착량에 따른 표면구조의 변화를 RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) 상(pattern)과 RHEED상의 회절반점(spot)강도 변화를 관찰하여 조사하였다. Si(111) 기판온도를  $400^\circ\text{C}$ 로 유지하면서 In을 증착시킬 때 증착량이 약 0.1, 0.3, 0.5 ML에서 각각  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ,  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ ,  $4 \times 1$ 구조가 관찰되기 시작하였다. 기판온도  $300^\circ\text{C}$ 에서는 증착량이 약 0.2 ML에서부터  $4 \times 1$ 구조가 나타나고 0.8 ML이상에서부터는  $4 \times 1 + \sqrt{3} \times \sqrt{3}$  혼합구조가 관찰되기 시작하였다. Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  구조의 기판온도를 실온으로 유지하면서 In을 증착시킬 때 증착량이 0.25, 0.7 ML에서 각각  $2 \times 2$ ,  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조가 나타나기 시작하였다. RHEED 반점의 강도변화를 이용하여 Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조에서의 In원자의 이탈 과정을 조사한 결과 이탈 에너지는 2.84 eV로 조사되었다.

**Abstract** - The change of surface structures for the deposition of indium on clean Si(111) surface is investigated as a function of substrate temperature and surface coverage by RHEED. We find that at substrate temperature of  $400^\circ\text{C}$ ,  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ,  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$  and  $4 \times 1$  structures are formed at indium coverages of 0.2, 0.3 and 0.5 ML, respectively. We also find that for the substrate temperature of  $300^\circ\text{C}$ ,  $4 \times 1$  structure starts to be formed by 0.2 ML of indium, and the mixed structure of  $4 \times 1$  and  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  is observed for more than 1.0 ML. On the other hand, if the indium is deposited on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  structure at room temperature,  $2 \times 2$  and  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  structures are found to form at 0.2 and 0.4 ML, respectively. From the desorption process, the desorption energy of indium in Si  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  structure is observed to be 2.84 eV.

## 1. 서 론

깨끗한 Si표면위에 In의 성장양식과 표면구조의 변화에 대하여 많은 연구가 되어왔다. Si(100)- $2 \times 1$  [1-4], Si(111)- $7 \times 7$  [5-7]과 벽개된 Si(111)- $2 \times 1$  [8] 표면위에 In의 흡착에 대한 실험은 LEED(Low Energy Electron Diffraction), AES(Auger Electron Spectroscopy) 및 RHEED(Reflection High Energy Electron Diffraction) 등을 이용하여 수행되었다.

결정표면에 다른종류의 원자를 증착시킬 경우에는 기

판의 표면온도, 증착원자의 종류, 증착량 등에 의존하는 다양한 초격자구조가 형성되어진다. 이와 같이 초격자구조의 변화에 따라 여러가지 표면물성이 나타나므로 그 표면구조의 해석은 매우 중요한 것으로 관심을 모으고 있다.

이에 RHEED를 이용한 표면의 초격자구조 연구는 RHEED 상 뿐만 아니라 RHEED회절점의 배열과 그들의 강도 변화를 분석함으로써 성장양식 및 증착원자의 이탈 현상에 대한 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Si(111)표면에 In을 증착시켜 증착된 두께와 기판표면의

온도 변화에 따른 RHEED상과 회절점의 강도 변화와의 상관관계 및 상전이 현상을 밝히고 Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조의 반점의 강도 변화를 이용하여  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조에서 In의 이탈 과정을 면밀히 조사하여 이탈 에너지를 구하였다.

## 2. 실험 방법

그림 (1)은 본 연구에 사용된 RHEED장치의 개략도이다.

RHEED 전자빔의 가속전압은 20 kV, 필라멘트의 인가전류는 2.0 A이며 전자빔의 직경은 0.2 mm이다. 이 전자빔을 편향 코일을 사용하여 빔의 경로를 조정하고 또한 미세조정장치를 사용하여 시료의 위치를 조정하였다. 본 실험에서는 Si(111)기판에 대한 전자빔의 입사방향은 [11 $\bar{2}$ ]로 고정하였으며 편향코일과 시료의 위치를 상하로 조정하므로써 입사각을 조정하였다. RHEED상의 반점강도를 측정하기 위한 장치는 광센서를 이용하여 본 연구실에서 제작하였다. RHEED 장치는 준비실과 분석실로 구성되어 있으며 분석실 내부의 진공은 Mechanical펌프, Turbo펌프를 이용하여  $2 \times 10^{-6}$  Torr 정도의 진공을 만든 후 Mechanical펌프, Turbo펌프로 계속 배기하면서 150~250°C로 약 10시간동안 baking 하였다. 그 후 Ion펌프, Ti-승화펌프, Cyro펌프를 이용하여  $2 \times 10^{-10}$  Torr 이하의 초고진공을 얻은 후 본 실험은  $5 \times 10^{-10}$  Torr에서 수행하였다. 시료의 기판은 p가 도핑된 n-type Si wafer로서 비저항은 100-120  $\Omega$ cm이고 배향은 [111]이었다. Si wafer를 4 mm  $\times$  20 mm  $\times$  0.6 mm로 절단한 다음 표준세척법으로 세척 후 건조한 질소가스를 불어 건조시킨 후 초고진공분석실에 시료장착장치에 고

정시킨 후 직접통전가열에 의해 1250°C로 수 회 가열함으로써 주 오염인 O, C를 제거하여 깨끗한 표면상태를 얻었다.

시료의 온도조절은 고유저항을 이용한 직접통전가열 방식으로 하였으며 온도측정은 고온계(pyrometer)와 chromel-alumel의 열전대를 사용하여 측정하였다. In 증착원(evaporator)은 텅스텐 필라멘트에 알루미늄을 발라 도가니를 만들어 건조시킨 후  $2 \times 10^{-7}$  Torr의 고진공의 준비실에서 가스 및 불순물을 제거한 후 분석실에 장착하여 사용하였다. 증착량의 조절은 필라멘트에 흘러주는 전류를 미세조정함으로써 0.1 ML/min로 증착하였다. 증착된 In의 두께측정에 수정진동자를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Si(111)-In의 증착시 RHEED반점의 강도 변화

Si기판을 400°C로 유지하면서 In을 증착시킨 경우의 RHEED 반점의 강도 변화를 그림 (2)에 나타내었다.

각 초격자구조의 반점 강도의 변화 모양을 보면  $7 \times 7$ 구조의 반점 강도가 약해짐에 따라서  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 반점은 강하게 되고 증착량이 0.3 ML에서  $7 \times 7$ 반점이 사라질 때  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 의 강도는 최대가 되었다.

이와 동시에  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 반점이 나타나기 시작했다. 증착량이 0.5 ML에서  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 반점이 사라짐과 함께  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 반점의 강도는 최대로 되고 동시에  $4 \times 1$ 반점이 나타났다. 그 후  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 반점이 서서히 사라지지

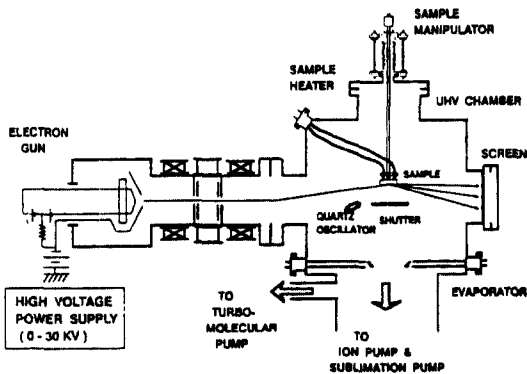


Fig. 1. A schematic diagram of the RHEED-AES system.

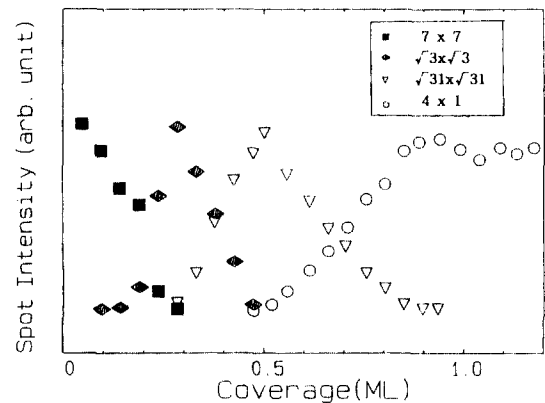
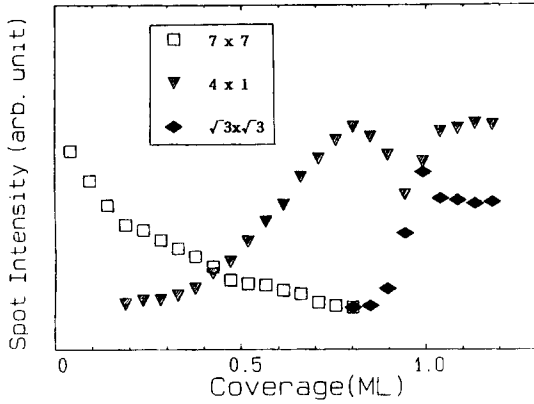
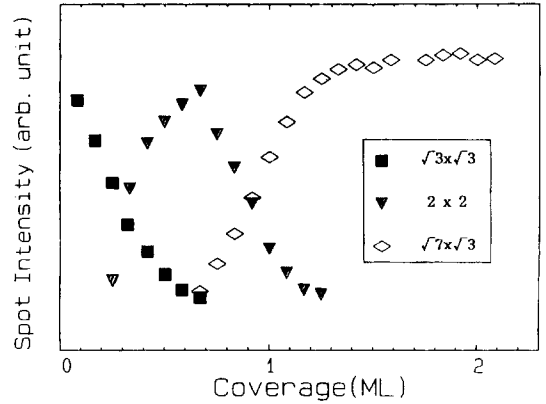


Fig. 2. Spot intensity analysis of In/Si(111). The substrate temperature was 400°C.



**Fig. 3.** Spot intensity analysis of In/Si(111). The substrate temperature was 300°C.



**Fig. 4.** Spot intensity analysis of Si(111)-In  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ . The substrate temperature was Room Temperature.

만 4×1반점의 강도는 그다지 변하지 않았다.  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ,  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 반점강도가 최대로 될 때 및 4×1반점강도가 일정하게 될 때의 흡착량은 각각 0.3, 0.5, 0.9 ML였다.

기관온도를 300°C로 유지하면서 In을 증착한 경우의 RHEED 반점의 강도변화를 그림 (3)에 나타내었다.

이 온도에서는  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ,  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$  구조는 형성되어 지지 않고 RHEED상에서는 7×7구조가 계속되다가 0.2 ML에서부터 4×1 반점이 나타나기 시작했다. 0.8 ML에서 4×1 반점의 강도가 최대가 되었고, 7×7반점은 사라졌다. 이와 동시에  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 반점이 나타나기 시작했다. 증착을 계속하면 4×1반점의 강도가 감소되어짐과 더불어  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 반점의 강도는 증가했다. 그러나, 증착량이 1.0 ML에서부터는 4×1반점의 강도가 다소 크지만 양 반점의 강도는 일정하게 유지되었다.

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 표면을 실온으로 유지하면서 In을 증착시킬 때 RHEED반점의 강도 변화를 그림 (4)에 나타내었다.

증착량이 0.25, 0.7 ML에서부터 각각 2×2,  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조가 형성되기 시작하였다. 증착량이 0.7 ML에서 2×2반점의 강도는 최대로 되었으며 이때  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 반점의 강도는 매우 약해졌다. 이와 동시에  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 반점이 나타나기 시작했으며 1.4 ML에서부터는  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 반점의 강도의 증가율이 감소하여 거의 일정하게 유지되었다.

### 3.2 Si(111)-In의 흡착 과정의 연구

RHEED에 의한 관찰

Si(111)-7×7(사진a) 표면을 400°C로 유지하면서 In을

증착시키면 증착량이 약 0.1 ML에서  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 구조, 약 0.3 ML에서  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 구조, 약 0.5 ML에서 4×1구조가 형성되어지기 시작하였다. 그리고 약 0.3, 0.5, 0.9 ML에서 각각 가장 선명한 RHEED 상이 관찰되었다. 기관온도 약 500°C 이상에서 In의 탈착이 시작되기 때문에 상전이온도를 정확히 구할 수는 없지만  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  구조의 경우 약 700°C에서,  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$  구조의 경우 약 550°C, 4×1 구조의 경우 520°C에서 각각 1×1구조로의 상전이가 일어났다.

Si(111)-7×7표면을 300°C로 유지하면서 In을 증착시키면 0.8 ML에서 7×7구조가 사라지면서 4×1구조가 더욱 선명하게 관찰되었고 1.0 ML에서부터는 4×1구조와  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 구조가 함께 나타나는 혼합구조가 관찰되었다. Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 구조[9] (사진b)표면을 실온으로 유지하면서 In을 증착시키면 0.7 ML에서 사진(c)와 같은 선명한 2×2구조가 관찰되었다.

이 RHEED 상은 2×1구조의 3개의 domain이 중첩되었을 가능성이 높다고 생각되며, 더욱 증착을 계속하면 1.4 ML에서 사진(d)같은 RHEED 상이 관찰되는데 이 구조에 대해서 S. Baba등[10]과 같이 5×5구조라고 하는 연구자도 있지만 상의 역격자를 보면 즉 초격자구조의 2개의 기본 vector의 크기가 1×1구조의 기본vector의  $\sqrt{7}$ ,  $\sqrt{3}$ 배 되어 있는 것으로  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 구조라 생각되어진다. 이 구조의 RHEED 상은 어떤 정해진 범위의 각도에서만 볼 수 있는 반사점이다. 이는 Si표면 위에 평평한 In의 island가 넓은 범위에서 성장하고 있다고 생각되어진다.

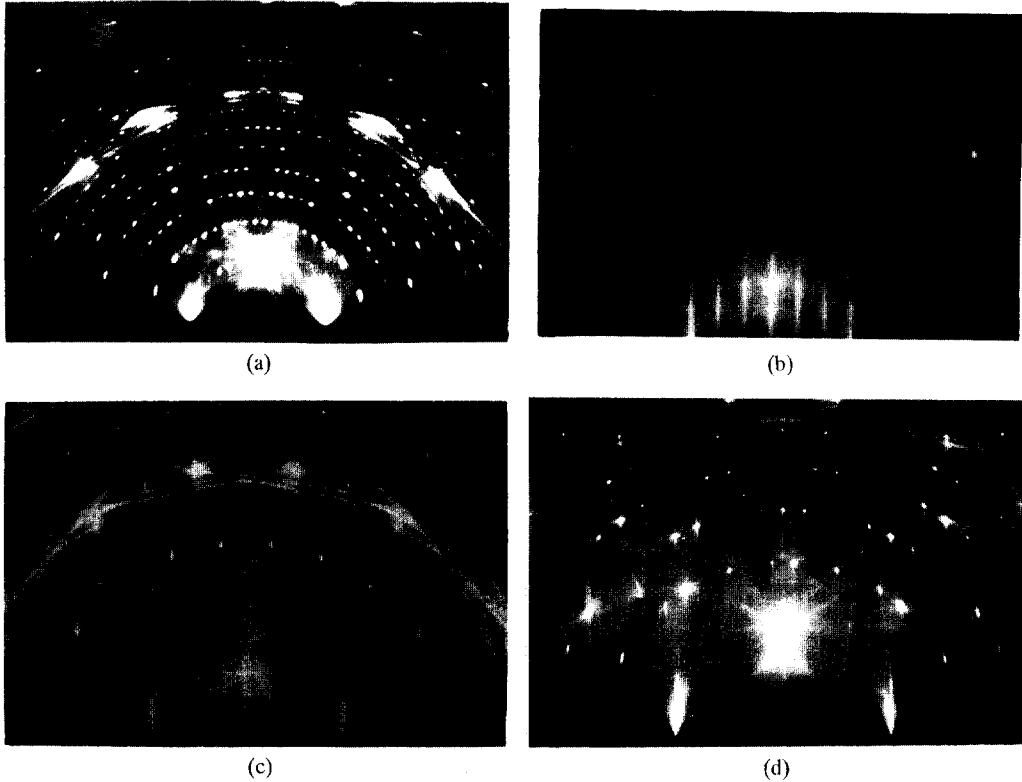


Photo. (a) Si(111) clean  $7 \times 7$  structure, azimuth $[11\bar{2}]$  ( $T = 400^\circ\text{C}$ ). (b) Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  structure, azimuth $[11\bar{2}]$  ( $T = \text{RT}$ ). (c) Si(111)- $2 \times 2$  structure, azimuth $[11\bar{2}]$  ( $T = \text{RT}$ ). (d) Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  structure, azimuth $[11\bar{2}]$  ( $T = \text{RT}$ ).

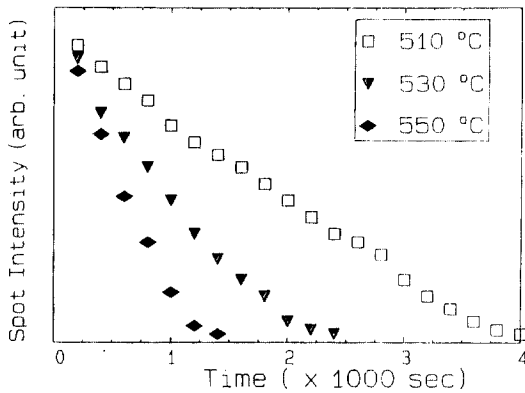


Fig. 5. Intensity of the Si(111)-In  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  spot versus annealing time. The substrate temperatures were  $510^\circ\text{C}$ ,  $530^\circ\text{C}$ ,  $550^\circ\text{C}$ .

### 3.3 Si(111)-In의 등은 이탈 과정

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  표면을 실온으로 유지하면서 In을 1.4 ML 증착시켜  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조를 형성시킨 후 기판 온도를

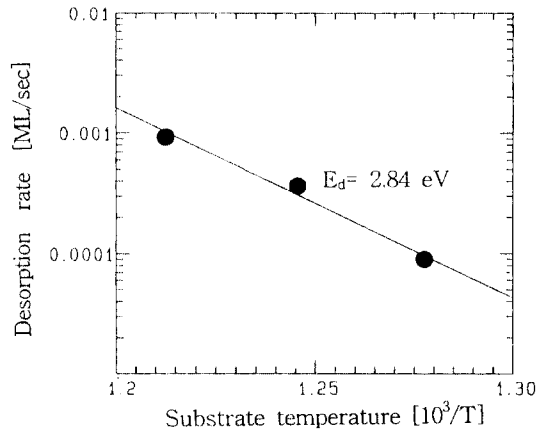


Fig. 6. The Arrhenius plot for Si(111)-In  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  surface.

상승시켜  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조에서의 In 원자의 이탈 에너지를 반점 강도의 감쇠 속도를 측정하여 구하였다. RHEED 상의  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  반점 강도는  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조의 면적에 비례하기 때문에  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조를 만드는 In 원자의 갯수에 비례한

다. 따라서  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  반점강도의 감쇠속도를 측정하면  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조를 형성하고 있는 In 원자의 이탈율을 측정할 수 있다. 기판온도를 510°C, 530°C, 550°C로 유지하였을 때 In의 이탈 과정을 그림 (5)에 나타내었다.

이러한 이탈 과정을 측정해 얻은 이탈율을 Arrhenius plot로 그림 (6)에 나타내어 이 기울기로부터 이탈활성화 에너지를 구하였다.  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조에서 In의 이탈활성화 에너지는 2.84 eV로 구하여 졌다. J.KALL 등[11]의 AES 실험값과 비슷하였다.

#### 4. 결 론

Si(111)-7×7 표면의 온도를 400°C 유지하면서 In을 증착시키면 증착량이 약 0.1 ML에서  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  구조, 약 0.3 ML에서  $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$  구조, 약 0.5 ML에서 4×1 구조가 형성되어지기 시작하였다. Si(111)-7×7 기판을 300°C로 유지하면서 In을 증착시키면 0.2 ML에서 7×7 구조가 서서히 사라지면서 4×1 구조가 형성되었고 1.0 ML에서 부터는 4×1 구조와  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  구조가 함께 나타나는 혼합 구조가 관찰되었다.

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  구조 표면을 실온으로 유지하면서 In을 증착해가면 0.25 ML에서부터 2×2 구조, 0.7 ML에서부터  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조가 관찰되었다. 이는 RHEED 반점의 강도 변화와도 일치되었다. Si(111) 표면에  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  구조를 만드는 In 원자의 이탈 에너지를  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 의 반점강도의 감쇠속도로 측정한 결과 In의 이탈 에너지는 2.84

eV로 조사되었다.

#### 감사의 글

이 연구는 1996년도 교육부 기초과학 육성연구비의 지원에 의한 것임.

#### 참고문헌

1. J. Knall, J. E. Sundgren, G. V. Hansson and J.E. Greene, *Surf. Sci.* **166**, 512 (1986).
2. N. Kuwata, T. Asai, K. Kimura and A. Mannami, *Surf. Sci.* **143**, L393 (1984).
3. J. J. Lander and J. Morrison, *Surf. Sci.* **2**, 553 (1964).
4. J. J. Lander and J. Morrison, *J. Appl. Phys.* **36**, 1706 (1965).
5. M. Kawaji, S. Baba and A. Kinbara, *Appl. Phys. Lett.* **34**, 748 (1979).
6. S. Baba, J.M. Zhou and A. Kinbara, *Japan. J. Appl. Phys.* **19**, L571 (1980).
7. H. Yasunaga, Y. Kubo and N. Okuyama, *Japan. J. Appl. Phys.* **25**, L400 (1986).
8. D. Bolmont, P. Chen, C.A. Sebeenne and F. Proix, *Surf. Sci.* **137**, 280 (1984).
9. T. Kinoshita, S. Kono and T. Sagawa, *Phys. Rev.* **B 34**, 3011 (1986).
10. S. Baba, H. Hirayama, J. M. Zhou and A. Kinbara, *Thin Solid Film.* **90**, 57 (1982).
11. J. Knall, S.A. Barnett, J.E. Sundgren and J.E. Greene, *Surf. Sci.* **209**, 314 (1989).