

## Hall 소자용 InAs 박막성장

김성만\* · 임재영 · 이철로 · 노삼규 · 신장규\* ·  
권영수\*\* · 유연희\*\* · 손정식\*\*\* · 김지언\*\*\*\*

한국표준과학연구원 물질량표준부, \*경북대학교 전자공학과,  
\*\*경희대학교 물리학과, \*\*\*영남대학교 물리학과, \*\*\*\*대양전기(주)  
(1999년 6월 26일 접수)

### InAs epitaxial layer growth for InAs Hall elements

S. M. Kim,\* J. Y. Leem, C. R. Lee, S. K. Noh, J. K. Shin,\* Y. S. Kwon,\*\*  
Y. H. Ryu,\*\* J. S. Son,\*\*\* and J. E. Kim\*\*\*\*

Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science  
\*Dept. of Electronics, Kyungpook Nat. Univ., \*\*Dept. of Physics, Kyunghee Univ.

\*\*\*Dept. of Physics, Yeungnam Univ., \*\*\*\*Daeyang Electric Co.

(Received June 26, 1999)

**요 약** - MBE 방법을 이용하여 [011] 방향으로 2° 기울어진 GaAs 기판 위에 InAs 에피층 성장을 연구하였다. InAs 에피층의 결정성은 GaAs의 완충층의 두께가 약 2500 Å일 때 가장 좋은 특성을 나타내고 있었다. 한편 As BEP 및 Si cell 온도 등의 성장조건을 변화시키면서 성장한 시료에 대하여 Hall effect를 측정하여 As/In BEP 비가 1.2~2.0의 영역일 때 가장 높은 이동도를 가지는 InAs 에피층을 얻을 수 있었다. Si 도우핑에 의해 전자농도가 증가함에 따라 이동도는 증가하다가 Si cell 온도 960°C ( $N_D=2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )를 기점으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. Si의 전자농도가  $N_D=2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 이동도가  $1.10 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 가장 높게 나타나고 있었다.

**Abstract** - We studied the properties of the InAs epitaxial layers grown on (100)-oriented GaAs (2° tilted toward [011]) by molecular beam epitaxy. From DCX (double-crystal x-ray), the better crystal quality was shown in InAs epitaxial layers on about 2500 Å GaAs buffer among the different buffer thickness. On the other hand, by changing As BEP and Si cell temperature in growing InAs epitaxial layers on GaAs, we obtained the high mobility of InAs epitaxy in As/In BEP ratio (1.2~2.0) from Hall effect measurement. The electron mobility increased as electron concentration increases, until Si cell temperature 960°C ( $N_D=2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). The mobility decreases as the Si cell temperature increases, at the temperature over 960°C. We obtained the high mobility ( $1.10 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ) at Si electron concentration of  $N_D=2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

## 1. 서 론

반도체 Hall 효과를 이용하여 자계를 검출하여 이를 전압신호로 출력하는 자기센서로는 주로 GaAs, InSb, InAs 등의 박막이 사용되고 있다. 자기센서의 응용분야가 최근에는 직류전류의 무접촉 검출, 자동차의 무접촉 회전 검출, 산업용 기계의 제어용 무접촉 위치검출 분야로 확대되고 있어 그 수요가 급증하고 있다. 이중 Hall 소자의 응용분야 중 많은 활용이 기대되고 있는 자동차

용 무접촉 센서는 -40~150°C의 온도범위에서 안정하게 작동하여야 하므로 온도 안정성이 매우 중요하다. 그러나 Hall 소자 시장의 80%를 점유하고 있는 InSb Hall 소자는 온도가 올라감에 따라 저항이 급격히 낮아지는 성질을 가지고 있으므로 100°C 이상의 온도에서 사용하는 것이 불가능하다 [1, 2].

한편 InAs(에너지갭 ~0.18 eV)는 InSb 보다 에너지 갭이 크므로 고온에서도 작동이 가능하고 자계변화에 따른 출력의 직진성이 매우 좋다는 장점을 가지고 있다 [3,

4). InAs를 이용한 Hall 소자는 InAs 박막의 높은 이동도 특성을 이용하고 있다. 이러한 이동도는 성장한 InAs 박막의 결정성과 매우 밀접한 관련을 가지고 있으므로 InAs의 결정성이 Hall 소자의 성능을 결정하게 된다. 따라서 InAs Hall 소자를 실현하기 위해서 가장 중요한 것은 고품위의 InAs 박막 성장기술이다. InAs 박막을 성장하기 위해서 사용되고 있는 기판은 GaAs이다. 그러나 GaAs기판과 InAs 박막 사이에는 약 7% 정도의 격자 부정합이 존재하기 때문에 InAs과 GaAs 기판 사이에서 많은 결함이 발생하고 있다. 따라서 결정성이 좋은 박막을 성장시키기가 매우 어렵다 [5, 6].

이에 본 연구에서는 분자선에피택시 방법을 이용하여 GaAs기판 위에 고품위의 InAs 박막을 성장하는 기술을 연구하였다. InAs 에피층 성장은 GaAs 완충층 두께, As BEP (beam equivalent pressure), Si cell 온도변화 등에 따라 성장시켰다. 성장된 InAs 박막의 특성을 DCX (double-crystal x-ray) 및 Hall effect 등으로 조사하였다.

## 2. InAs 에피층 성장

본 연구에서 InAs 에피층의 성장은 MBE 방법을 이용하였다. InAs 에피층을 성장하기 위하여 사용한 기판은  $[0\bar{1}1]$  방향으로  $2^\circ$  기울어진 GaAs(100)이었다. GaAs 기판을 Mo-블럭 위에 In으로 접착한 후 loading 챔버에 장착하였다. Loading 챔버에서  $250^\circ\text{C}$ 로 10분간 탈가스 한 후 성장 챔버로 이송하였다. 성장챔버에서 As빔을 조사시켜 주면서 기판온도를 올려서  $540^\circ\text{C}$ 에서 산화막을 제거한 후 기판온도를  $580^\circ\text{C}$ 로 올려 buffer층을 성장하였다. Buffer층을 성장한 후 기판온도를  $480^\circ\text{C}$ 로 내려 InAs 에피층을 성장하였다. 에피층 성장은 GaAs 완충층의 두께, As BEP 변화, Si cell 온도 등을 변화시키면서 InAs 에피층을 성장하였다. 이때 시료의 종류에 관계없이 InAs 에피층의 두께는  $5000\text{ \AA}$ 으로 고정시켰다.

앞서 언급하였듯이 GaAs 기판과 InAs 에피층 사이에는 약 7%의 격자 부정합이 존재하기 때문에 GaAs 기판 위에 InAs는 초기에 Stranski-Krastanov 모드로 성장하게 된다. 따라서 InAs의 성장 초기에는 2 monolayer 이내에서 단층성장을 하다가 그 이상의 두께가 되면 strain 에너지에 의해 3차원적인 성장을 하게 된다. 그러나 본 연구에서의 목적은 이와 같은 3차원적인 핵성장의 형성을 최소한으로 줄여 결정성 좋은 InAs 에피층을 성장하여야 한다. 본 연구에서 사용한  $[0\bar{1}1]$  방향으로

$2^\circ$  기울어진 GaAs(100) 기판 위에서는 초기에 단층성장을 하는 시간이 기울어지지 않은 GaAs 기판 위보다 초기의 단층성장 시간이 더 길었으며, 반면 3차원으로 형성된 양자점이 성장표면에 존재하는 시간이 줄어들었다. 이는 기울어진 기판은 표면에 존재하는 step으로 인하여 격자부정합에 의한 strain 에너지를 줄여주기 때문이다 [7, 8].

## 3. 실험 결과 및 논의

GaAs 완충층의 변화에 따라 성장한 시료에 대하여 완충층의 효과를 DCX로 조사하였다. 성장된 InAs 에피층의 두께는 모두  $5000\text{ \AA}$ 이었다. 그림 1은 DCX로 측정된 rocking curve이고 그림 2는 이들로부터 구한 FWHM과 피크분리를 나타낸 것이다. GaAs 완충층의 두께가 두꺼워질수록 FWHM은 감소하고 있다. GaAs 완충층의 두께가 약  $2500\text{ \AA}$ 일 때 까지는 FWHM의 감소가 급격하게 일어나고 있으나 그 이상의 두께에서는 매우 느리게 감소하고 있다. DCX에서 FWHM은 결함밀도와 매우 밀접한 관련성을 가지고 있다. 따라서 GaAs 완충층의 두께가 두꺼워짐에 따라 기판과 완충층 사이의 계면으로부터 전파되는 결함은 급격히 감소하기 시작한 후 약

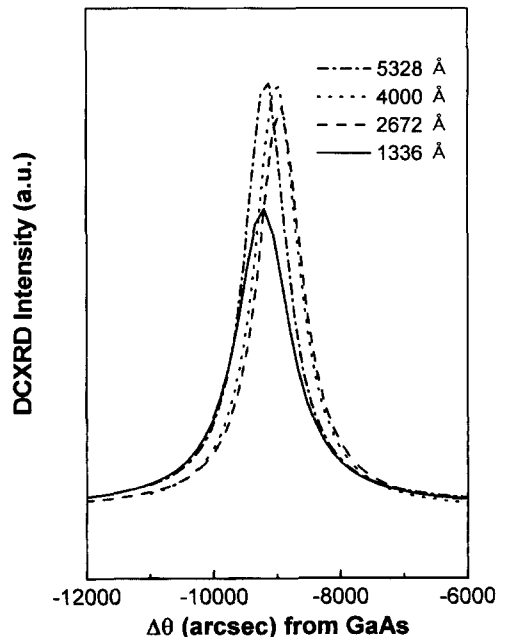


그림 1. DCX에 의한 InAs 에피층의 rocking curve.

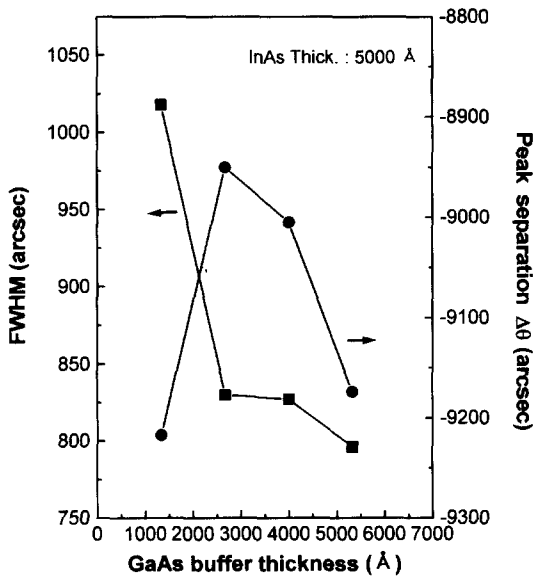


그림 2. DCX rocking curve로부터 구한 FWHM과 피크분리.

2500 Å 정도의 두께에 이르면 계면으로부터 전파된 결합은 대부분 소멸하게 된다. 이러한 임계두께 이상부터는 격자부정합으로부터 발생한 결합이 소멸하게 된다 [9, 10].

한편 피크 분리는 GaAs 완충층의 두께가 2500 Å이 될 때까지는 감소하다가 그 이상의 두께부터는 오히려 감소하고 있다. 피크 분리에서 음의 부호는 인장응력을 의미하는 것이다. 완충층의 두께가 너무 얇으면 격자 부정합과 계면의 불완전성으로부터 발생한 결합이 InAs 에피층까지 전파되어 InAs 에피층의 결합에 의해 이완되기 때문이다. 완충층의 두께가 약 2500 Å에서 최소의 피크분리를 나타내고 있는데 이는 이 두께에서 InAs 에피층이 가장 coherent하게 성장되고 있음을 나타내는 것이다. 그 이상의 두께에서 피크분리가 커지는 이유는 GaAs 완충층에서 결합이 줄어들기 때문에 InAs 성장층이 고유한 격자상수를 가지고 성장할 가능성이 높아지기 때문이다.

Hall 효과 측정은 van der Pauw(vdP) 방법으로 하였다. vdP 방법에서는 원리적으로는 임의 모양의 시료도 측정이 가능하지만 Hall parameter들에 대한 해는 해석적이지 못하여 실험적으로 결정하는 기하학적인 보정함수를 도입하여야 한다. 이때 전기적 특성이 대칭인 시료의 보정함수의 값이 1이 되기 때문에 Hall 측정에서 오는 해의 오차를 최소화시키기 위하여 시료를 정사각형

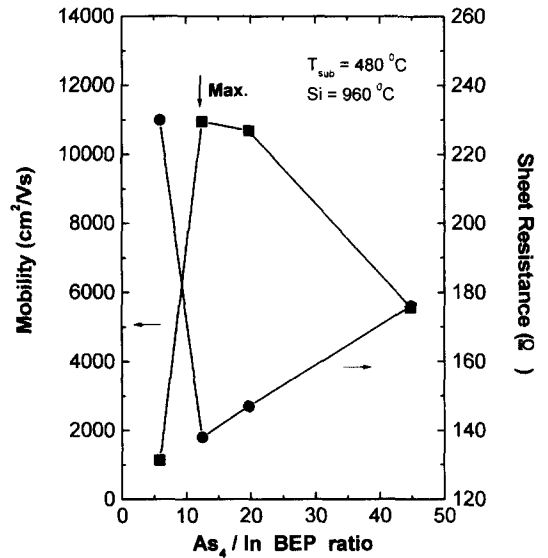


그림 3. As/In BEP 비에 따른 이동도와 면저항 의존성.

으로 만들었다. 성장이 끝난 시료를  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  크기로 만들었다. 시료의 네 모퉁이에 직경 1 mm의 In 전극을 붙인 후 시료를 RTA 장비 속에 넣고 질소 분위기에서  $450^\circ\text{C}$ 로 3분간 열처리하여 Ohmic contact 특성을 좋게 하였다. 제작된 시료는 Hall 효과 측정을 위해 액체 LN<sub>2</sub> cryostat에 장착시켰다. 이 장치는 77~500K 범위에서 온도변화가 가능하고  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 온도 안정성을 가지고 있다. Hall 효과 측정은 computer로 interface화 되어 있어 자동으로 측정할 수 있다. 그림 3은 In의 BEP를  $2.9 \times 10^{-7}$  Torr로 고정시키고 As의 BEP를 변화시키면서 성장한 InAs 에피층의 As/In의 BEP 비에 따른 이동도와 면저항의 변화를 나타낸 것이다. BEP 비가 증가함에 따라 이동도는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있으며, 면저항은 이동도와는 반대 현상을 나타내고 있다. BEP 비가 낮은 영역에서 이동도가 감소하는 이유는 As의 부족으로 결정성 좋은 InAs층이 성장되지 못하기 때문이다. InAs의 성장은 성장표면에 충분한 As이 존재할 경우 표면에 입사된 In이 As과 결합하여 에피층을 형성하게 된다. 한편 과다한 BEP 비의 경우에는 성장표면에 도달한 In이 표면에 존재한 As에 의한 영향으로 충분한 migration을 하지 못하기 때문에 오히려 결정성이 더 나빠지게 된다. 본 연구에서는 As/In의 BEP 비가 12~20의 영역일 때 가장 높은 이동도를 가지는 InAs 에피층을 얻을 수 있었다 [11, 12]. 이들 결과는 Kubiak 등 [13]의 결과와도 매우 잘 일치하고 있다.

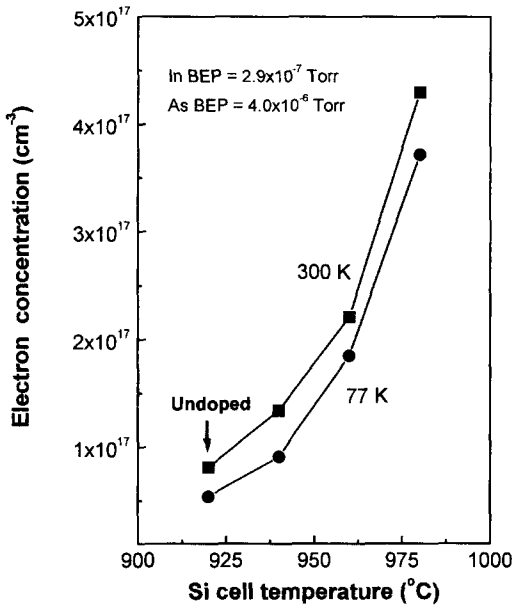


그림 4. Si cell 온도에 따른 전자농도.

그림 4는 As과 In의 BEP를 각각  $4.0 \times 10^{-6}$ ,  $2.9 \times 10^{-7}$  Torr로 고정된 후 Si cell의 온도를 변화시키면서 성장한 InAs 에피층에 대하여 전자농도를 측정된 결과이다. Si cell의 온도가 증가함에 따라 전자농도는 지속적으로 증가하고 있다. 77 K에서 측정된 전자농도는 300 K와 비교하여 낮게 나타나고 있으나 거동은 매우 유사하다.

그림 5는 As의 BEP를  $4.0 \times 10^{-6}$  Torr로 고정된 후 Si cell의 온도를 변화시키면서 성장한 InAs 에피층에 대하여 이동도와 면저항을 측정된 결과이다. Si 도우핑에 의해 전자농도가 증가함에 따라 이동도는 증가하다가 Si cell 온도  $960^\circ\text{C}$  ( $N_D = 2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )를 기점으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 GaAs 계열 III-V족 화합물 반도체에서는 전자의 농도가 증가함에 의해 이온화된 불순물에 의한 scattering이 증가하기 때문에 이동도는 감소하게 된다. 그러나 InAs 에피층에서는  $N_D = 2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 이동도가  $1.10 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 가장 높게 나타나고 있다 [14-16]. Si cell 온도가  $940^\circ\text{C}$  ( $N_D = 9.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )일 때의 이동도 감소는 결정성과 관련 지을 수 있다. Si를 도우핑 하지 않은 undoped InAs 에피층의 경우는 오히려 더 낮은 이동도를 나타내고 있다. 즉 InAs는 GaAs과 격자부정합이 크기 때문에 많은 결함을 가지게 된다. 따라서 undoped InAs의 경우는 이동도가 낮게 나타나고 있다. 이와 같은

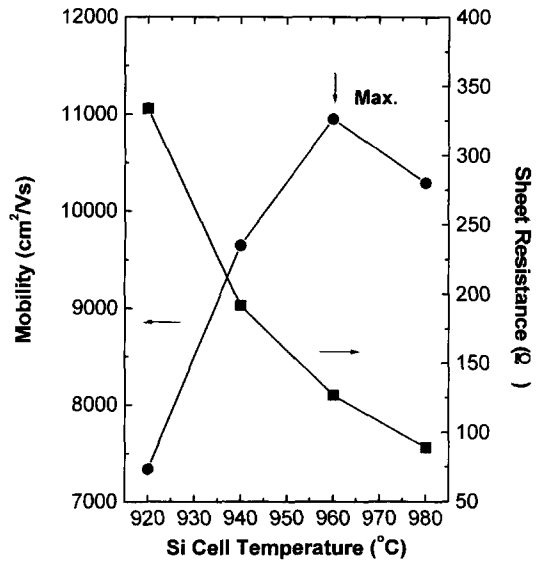


그림 5. Si cell 온도에 따른 이동도와 면저항 의존성.

결정에 Si이 적정량 주입되면 이 Si이 결함을 줄여주는 역할을 하기 때문에 전자의 농도가 증가하여도 결정성이 좋아지므로 오히려 이동도는 증가하게 된다. 이와 같은 현상은 격자부정합한 넓은 밴드갭 [17]을 가지는 박막성장에서 흔히 나타나는 현상인데 좁은 밴드갭을 가지는 InAs 에피층에서도 이와 같은 현상이 나타나고 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 MBE 방법을 이용하여  $[0\bar{1}\bar{1}]$  방향으로  $2^\circ$  기울어진 GaAs 기판 위에 InAs 에피층 성장을 연구하였다. GaAs 완충층의 두께에 따라 성장한 InAs 에피층에 대해 DCX를 측정된 결과 GaAs 완충층의 두께가 약  $2500 \text{ \AA}$ 일 때 까지는 완충층의 증가에 따라 FWHM의 감소가 급격하게 일어나고 있었으나 그 이상의 두께에서는 매우 느리게 감소하고 있었다. InAs 에피층의 결정성은 GaAs의 완충층의 두께가 약  $2500 \text{ \AA}$ 일 때 가장 좋은 특성을 나타내고 있었다. 한편 As/In BEP 비 및 Si cell 온도 등의 성장조건을 변화시키면서 성장한 시료에 대하여 Hall effect를 측정된 결과 As/In BEP 비가 12~20 정도일 때 가장 높은 이동도를 가지는 InAs 에피층을 얻을 수 있었다. 이와 같은 현상은 As 양에 따른 InAs 층의 결정성 변화와 깊은 관련성을 가지

고 있는 것으로 생각된다. Si 도우핑에 의해 전자농도가 증가함에 따라 이동도는 증가하다가 Si cell 온도 960°C ( $N_D = 2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )를 기점으로 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 이러한 현상은 Si 도우핑이 결함을 줄여 주는 역할을 하기 때문에 결정성 회복에 중요한 역할을 하고 있음을 나타내는 것이다. Si의 전자농도가  $N_D = 2.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 이동도가  $1.10 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 로 가장 높게 나타나고 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 대양전기(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- [1] S. M. Sze, *Semiconductors Sensors* (John Wiley & Sons, Inc, 1994).
- [2] R. S. Popovic, J. A. Flanagan, P. A. Besse, *Sensor and actuator* **A56**, 39 (1996).
- [3] I. Shibusaki, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Ito, F. Ichimori, T. Yoshida, and K. Harada, *Tech. Dig. of the 10th Sensor Symp.* (IEE Japan, 1991), p. 113.
- [4] I. Shibusaki, Y. Kanayama, T. Ito, F. Ichimori, K. Nagase, T. Yoshida and K. Harada, *Digest of Technical Papers, Transducers* (IEEE, 1991), p. 1069.
- [5] E. H. C. Parker, *The technology and physics of molecular beam epitaxy* (Plenum Press, 1985).
- [6] I. Shibusaki, *The 8th Sensor Symp.* C3-1, *tech. Dig.* (IEE, Tokyo, 1989), p. 211.
- [7] L. C. Cai, H. Chen, C. L. Bao, Q. Huan, J. M. Zhou, *J. Crystal Growth* **197**, 364 (1999).
- [8] N. Kuze, K. Nagase, S. Muramatsu, S. Miya, T. Iwabuchi, A. Ichii, and I. Shibusaki, *J. Crystal Growth* **150**, 1307 (1995).
- [9] M. Nishitani-Gamo, I. Sakaguchi, K. P. Loh, T. Takami, I. Kusunoki, and T. Ando, *Diamond & Related Materials* **8**, 693 (1999).
- [10] D. M. Holmes, E. S. Tok, J. L. Sudijono, T. S. Jones, and B. A. Joyce, *J. Crystal Growth* **192**, 33 (1998).
- [11] E. S. Tok, J. H. Neave, F. E. Allegretti, J. Zhang, T. S. Jones, and B. A. Joyce, *Surface Science* **371**, 277 (1997).
- [12] E. S. Tok, J. H. Neave, J. Zhang, B. A. Joyce, and T. S. Jones, *Surface Science* **371**, 397 (1997).
- [13] R. A. A. Kubiak, E. H. C. Parker, S. Newstead, and J. J. Harris, *Appl. Phys.*, **A35**, 61 (1984).
- [14] A. Yamashi, X. Q. Shen, and T. Nishinaga, *J. Crystal growth* **174**, 539 (1997).
- [15] A. Shen, H. Ohno, Y. Horikoshi, S. P. Guo, Y. Ohno, and F. Matsukura, *Applied Surface Science* **130-132**, 382 (1998).
- [16] J. G. Belk, D. W. Pashley, C. F. McConville, and B. A. Joyce, T. S. Jones, *Surface Science* **410**, 82 (1998).
- [17] I. H. Lee, I. H. Choi, C. R. Lee, S. J. Son, J. Y. Leem, and S. K. Noh, *J. Crystal. Growth* **182**, 314 (1997).