

V 홈 바닥에 형성된 일차원 InAs 양자점

손창식[†] · 최인훈* · 박용주**

신라대학교 광전자공학과

*고려대학교 재료공학과

**한국과학기술연구원 나노소자연구센터

One-dimensional Array of InAs Quantum Dots on Grown V-grooves

Chang-Sik Son[†], In-Hoon Choi*, and Young Ju Park**

Department of Photonics, Silla University, Busan 617-736

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701

**Nanodevice Research Center, KIST, Seoul 130-650

(2003년 8월 23일 받음, 2003년 10월 7일 최종수정본 받음)

Abstract One-dimensional array of InAs quantum dots (QDs) have been grown on V-grooved GaAs substrates by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition. Atomic force microscope images show that InAs QDs are aligned in one-dimensional rows along the $[0\bar{1}1]$ oriented bottom of V-grooves and no QDs are formed on the sidewalls and the surface of mesa top. Capability to grow one-dimensional InAs QDs array would be feasible for the single electron tunneling devices and other novel quantum-confined devices.

Key words quantum dots, InAs, MOCVD, AFM, SEM

1. 서 론

최근 양자선(quantum wires; QWRs)과 양자우물(quantum wells; QWs)과 함께 양자점(quantum dots; QDs)이 단전자소자(single electron devices), 고밀도메모리 및 양자점 발광소자와 같은 신개념의 양자기능소자 제작에 대한 유력한 후보로서 각광받고 있다. 그 중에서도 Stranski-Krastanow 모드에 의해 형성된 자발형성 양자점(quantum dots; QDs)에 관한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 동일한 성장면에서 외부 반사기나 변조기를 포함한 집적 광전소자와 같은 집적회로 제작을 위해서는 성장면에서 양자점의 배열을 조절할 수 있고, 그들의 균일도를 향상시켜야만 한다. 이러한 구조를 제작하기 위해서는 양자점의 위치를 제어하기 위한 기술이 요구된다. 그러나 평탄한 기판에서 성장한 일반적인 성장 기술을 사용하여 양자점의 정확한 위치제어가 어렵다. 일반적으로 양자점은 평탄한 기판에서 전체적으로 불균일하게 분포된다. 그래서 위치 조절을 향상시키기 위해 패터닝된 기판에서의 양자점 형성에 관한 연구가 각광받고 있다. 양자점의 위치 조절을 위한 몇 가지 방법이 제안되었다. 산화막으로 덮여진 기판에서 산마루 형태나 사면체 구멍으로 패터닝을 한 후 이렇게 패터닝된 부분에서 양자점이 형성하거나, 기울어진 기판을 사용하여 다원자 계단을 지닌 원추형 위에 형성시키기도 하였다.⁴⁻¹⁰⁾ 또한 전

자빔 리소그래피(electron beam; E-beam lithography)와 AFM 리소스그래피(atomic force microscopy lithography) 방법으로 자발형성된(self-organized) 양자점의 선택적인 위치 조절을 하였다.¹¹⁻¹³⁾

특히 위치 조절된 일차원 양자점은 단전자소자, 결합된 두개의 양자점을 이용한 공명터널다이오드(resonant tunneling diodes; RTDs), 양자점레이저(QDs lasers)와 같은 새로운 양자구속소자의 구현을 가능하게 할 수 있다. Zhang은 산화막으로 패터닝된 GaAs 기판 위에 $[011]$ 및 $[0\bar{1}1]$ 방향으로 형성된 메사(mesa) 윗면에 InAs 양자점을 형성하였다.⁵⁾ Kim은 2° 기울어진 (100) GaAs 기판 위의 다원자 스텝(step)에 선 형태의 InAs 양자점이 형성됨을 보고하였다.⁸⁾ 그러나 현재까지 V 홈의 형태로 패터닝된 GaAs 기판을 사용하여 V 홈 바닥에 형성된 일차원 InAs 양자점에 관한 보고는 거의 없었다. 본 연구에서는 산화막 마스크 및 정밀한 리소그래피 공정을 사용하지 않고서 성장조건의 조절만으로 위치 조절된 일차원 InAs 양자점의 형성에 관하여 고찰하고자 한다. 저압 MOCVD(low-pressure metalorganic chemical vapor deposition) 방법으로 일차원 InAs 양자점을 V 홈 바닥에 성공적으로 형성시킬 수 있었다.

2. 실 험

포토리소그래피(photolithography)와 $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}(1:3:50)$ 용액을 사용한 습식 에칭 방법으로 $4\ \mu\text{m}$

[†]E-Mail : csson@silla.ac.kr

의 주기를 가진 V 홈을 (100) 반절연 GaAs 기판 위에서 방향으로 형성시켰다. V 홈 내에 형성된 옆면은 (111)A 면이었다. 패터닝 기판을 저압 MOCVD 반응관에 장착하기 전에 표면 산화막을 제거하고 옆면의 표면 평활도를 향상시키기 위해 같은 에칭 용액으로 10초간 에칭하였다. 에피층 성장은 rf-가열 수평 석영 반응관에서 이루어졌으며 시편의 표면이 밑을 향하도록 장착되었다. 반응관의 압력은 76 torr로 유지되었다. 이송 가스는 플라즈마 정제기로 정제된 수소를 사용하였고 총유량은 4,000 sccm이었다. 에피층 원료로서는 트리에틸갈륨(triethylgallium; TEG), 트리메틸알루미늄(trimethylaluminum; TMA) 및 AsH_3 (20%)을 사용하였다.

V 홈으로 패터닝된 GaAs 기판 위에 InAs 양자점을 다음과 같이 성장하였다. 성장 순서와 V 홈 바닥 부분에서의 두께는 GaAs 완충층(buffer layer; 230 nm), $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 클래딩층(cladding layer; 330 nm), GaAs 스페이스 층(spacer layer; 23 nm), InAs 양자점의 순서이다. GaAs 스페이스 층까지는 AsH_3 의 유량을 250 sccm로 유지하면서 $610^\circ C$ 에서 성장하였다. 다음으로 100 초 동안 성장 온도를 $610^\circ C$ 에서 $500^\circ C$ 으로 내리고, 10 초 동안 AsH_3 의 유량을 250 sccm에서 5 sccm으로 감소시킨 후에 InAs 양자점을 성장하였다. 시편의 표면은 AFM과 고분해능 SEM(scanning electron microscopy)을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

패터닝된 GaAs 기판의 (111)A 옆면과 메사 윗면에는 InAs 양자점이 형성되지 않고, V 홈의 바닥에만 양자점이 형성되는 성장 조건에서 양자점을 형성하였다. 이전의 연구에서 같은 성장 장치를 사용하여 AsH_3 의 유량을 250 sccm로 유지하면서 $610^\circ C$ 에서 $In_xGa_{1-x}As$ 양자점을 성장하였다.¹⁴⁾ 그러나 InAs 양자점은 이와 같이 높은 AsH_3 의 유량에서는 형성되지 않는다. InAs 양자점을 성장하는 동안에는 AsH_3 의 유량을 5 sccm으로 유지한다. 낮은 AsH_3 의 유량에서 InAs 양자점은 V 홈의 바닥에 성공적으로 형성된다. Fig. 1은 AFM으로 관찰한 V 홈의 바닥에 위치한 고립된 단일 InAs 양자점의 보여준다. 반면에, (111)A 옆면과 메사 윗면에서는 양자점이 형성되지 않는다. InAs 양자점은 V 홈의 바닥에서 방향으로 늘어난 타원형 형태를 보인다. 및 방향으로의 양자점의 넓이는 각각 150 및 80 nm이고, 양자점의 높이는 45 nm이다. V 홈이 새겨진 성장 면에서 InAs 층이 성장될 때, In-부착원자(adatom)는 (111)A 옆면에서 V 홈의 바닥으로 쉽게 확산된다고 알려져 있다. 이러한 경향성은 V 홈 바닥으로 In-부착원자들의 축적을 가져온다. 낮은 AsH_3 의 유량에서 In-부착원자는 V 홈의 바닥을 따라서 핵형성 자리로 쉽게 확산되고, 양자점 형성 효율을 향상시킨다. 이와 동시에 메사 윗면의 표면에서 양자점 성장은 옆면을 통한 V 홈의 바닥으로의 In-부착원자의 확산

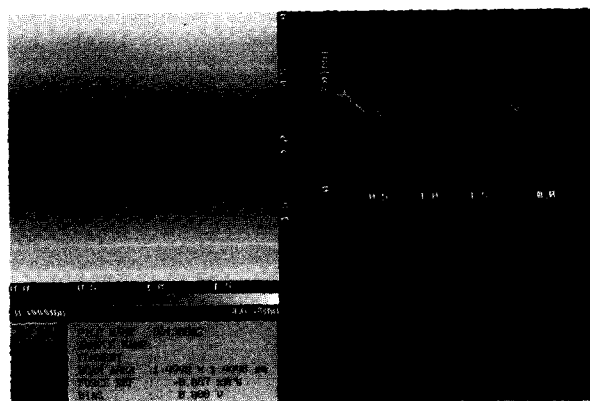


Fig. 1. AFM image of single InAs QD placed in the bottom of V-groove.

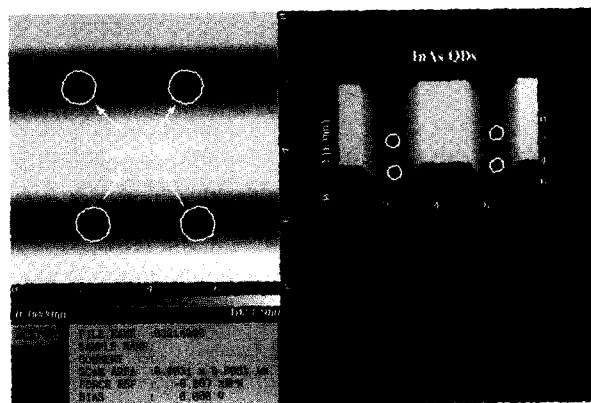


Fig. 2. AFM image of one-dimensional InAs QD array placed in the bottom of V-grooves.

에 의해 억제된다. 위의 두 가지 효과로 인해 V 홈 바닥에서 InAs 양자점의 일차원적인 분포를 가져온다. V 홈으로 패터닝된 기판 위에 간단한 성장 방법으로 일차원 InAs 양자점 배열을 형성시킬 수 있다. Fig. 2는 이웃한 V 홈들의 바닥에 형성된 일차원 InAs 양자점 배열을 AFM으로 관찰한 사진이다. 흰원은 양자점의 위치를 표시한 것이다. 양자점은 V 홈의 바닥을 따라서 일차원으로 잘 배열되어 있고, (111)A 옆면과 메사 윗면에는 형성되지 않는다. 이러한 일차원 InAs 양자점은 이웃한 V 홈에서도 일차원으로 배열되어 있다. InAs 양자점은 패터닝된 V 홈들의 바닥에 동일한 양상으로 형성된다.

Fig. 3는 SEM으로 관찰한 V 홈의 바닥에 위치 조절된 일차원 InAs 양자점들이다. Figure에서 볼 수 있듯이 InAs 양자점들이 V 홈의 바닥을 따라 일차원으로 배열되어 있는 것이 명확히 관찰된다. 또한 고분해능 SEM을 사용함으로써 AFM 사진에서는 볼 수 없었던 표면 면적이 10분 1 이하의 작은 크기의 양자점들이 큰 양자점들 사이에 상대적으로 형성되어있음을 관찰할 수 있다. V 홈의 바닥에 형성된 일차원 InAs 양자점의 형성에 관한 기구는 현재로는 완전히 밝혀지지 않았지만, 기울어진 기판의 다원자 테라스의 끝에서의 양자점 형성과

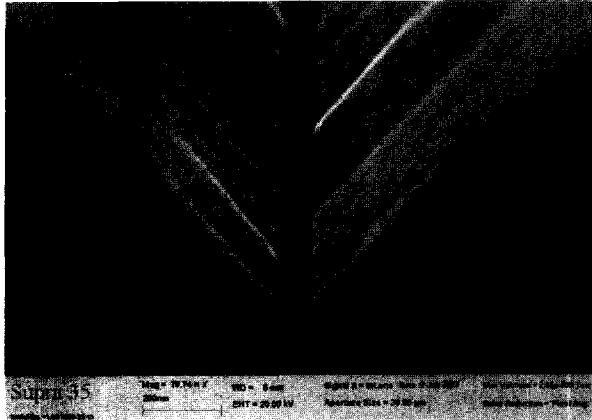


Fig. 3. SEM image of one-dimensional InAs QD placed in the bottom of V-groove.

관련이 있다.⁸⁾ V 홈의 바닥에서의 InAs 양자점의 형성은 Fig. 2에서 볼 수 있는 V 홈의 옆면에 형성된 테라스(terraces)에 기인한 것이다. 또한 양자점의 크기가 불균일한 것도 (111)A 면에 형성된 테라스의 불균일성에 기인한 것으로 사료된다. InAs 성장 중에 옆면 위의 In-부착원자들이 표면 에너지가 높은 테라스 쪽으로 확산을 하고, 테라스로 확산된 In-부착원자들이 테라스를 따라서 V 홈의 바닥으로 확산을 하는 과정을 거쳐서 V 홈의 바닥에 일차원 InAs 양자점이 형성된다. 또한 기판이 V 홈을 따라서 약간 기울어져 있을 때, 스텝이 테라스의 끝에 형성되므로, 테라스의 폭이 기판의 기울기 각으로 조절될 수 있고, 따라서 일차원 InAs 양자점의 선밀도 조절이 가능할 것이다.

본 연구에서 구현한 성장 방법은 다양한 주기로 패턴된 V 홈의 바닥에 일차원 InAs 양자점의 배열을 형성시킬 수 있으므로 양자점 이득결합 DFB 레이저(QDs gain-coupled distributed feedback lasers)에도 응용이 가능한 성장방법이다.

4. 결 론

본 연구에서는 저압 MOCVD를 사용하여 V 홈 형태로 미리 패턴된 GaAs 기판 위에 일차원 InAs 양자점을 형성시킬 수 있는 새로운 성장 방법을 개발하였다. V 홈

의 바닥을 따라서 완전히 고립되고, 공간적으로 위치 조절된 일차원 InAs 양자점이 형성된다. 그러나 (111)A 옆면과 메사 윗면에는 형성되지 않는다. 이렇게 위치 조절된 일차원 InAs 양자점은 산화막 마스크 및 정밀한 리소그라피 공정을 사용하지 않고서 성장조건의 조절만으로 형성이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호; R01-2000-00027)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. J. Y. Marzin, J. M. Gerard, A. Izrael, D. Barrier and G. Bastard, *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 716 (1994).
2. R. Notzel, J. Temmyo, H. Kamada and T. Funuta, *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 457 (1994).
3. S. K. Jung, S. W. Hwang, B. H. Choi, S. I. Kim, J. H. Park, Y. Kim, E. K. Kim and S. K. Min, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 714 (1999).
4. R. Tsui, R. Zhang, K. Shiralagi and H. Goronkin, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3254 (1997).
5. R. Zhang, R. Tsui, K. Shiralagi, D. Convey and H. Goronkin, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 505 (1998).
6. D. S. L. Mui, D. Leonard, L. A. Coldren and P. M. Petroff, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1620 (1995).
7. J. Tatebayashi, M. Nishioka, T. Someya and Y. Arakawa, *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 3382.
8. H. J. Kim, Y. J. Park, Y. M. Park, E. K. Kim and T. W. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3253 (2001).
9. A. Konkar, A. Madhukar, and P. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 220 (1998).
10. S. Jeppesen, M. S. Miller, D. Hessman, B. Kowalski, I. Maximov and L. Samuelson, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2228 (1996).
11. T. Ishikawa, S. Kohmoto and K. Asakawa, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1712 (1998).
12. M. Borgstrom, K. Johansson, L. Samuelson and W. Seifert, *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 1367.
13. S. Kohmoto, J. Nakamura, T. Ishikawa and K. Asakawa, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3488 (1999).
14. C. S. Son, T. G. Kim, X. L. Wang and M. Ogura, *J. Crystal Growth*, **221**, 201 (2000).