

GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Laser에서 Deep Mesa 구조에 의한 문턱전류 감소

한일기* · 송진동 · 이정일

한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울 136-791

(2008년 9월 23일 받음, 2008년 10월 16일 수정, 2008년 11월 9일 확정)

GaAs/AlGaAs 물질계를 기반으로 한 양자폭포레이저를 제작하였다. 양자폭포레이저는 활성층의 위까지만 식각된 shallow mesa 구조와 활성층까지 식각된 deep mesa 구조로 제작되었다. shallow mesa 구조의 경우 문턱전류 밀도가 26-32 kA/cm² 이었지만 deep mesa 구조의 경우 문턱전류 밀도는 13 kA/cm²로 대단히 감소되었다. Deep mesa 구조에서의 문턱전류 감소는 측면 방향으로의 전류 손실이 감소되었기 때문으로 설명되었다.

주제어 : 양자폭포레이저, 양자우물, 문턱전류

I. 서 론

양자폭포레이저 (quantum cascade lasers)는 밴드간 전이 (transition)를 이용하는 일반 반도체 레이저 다이오드와는 달리 전도대 (conduction band) 내의 부밴드 (sub-band) 사이의 전이를 이용한다는 점에서 고유한 특성을 갖는다. 부밴드 사이의 전이를 이용하므로 ps 수준의 고속동작이 가능하고 [1-3], 활성층으로 사용되는 에피층의 두께 조절만으로도 발진파장을 mid-IR에서 THz 영역까지 조절할 수 있게 된다 [4-6]. 또한 발진파장이 길어짐에 의한 Rayleigh 산란율이 급격히 감소하게 되어서 ppb 수준의 고감도 가스센서를 위한 광원으로도 활용할 수 있게 된다 [7,8].

최근 양자폭포레이저의 상온 연속 발진 등 중요한 연구 결과가 발표되었으나 InGaAs/ InAlAs 물질계를 이용한 것이고 GaAs/AlGaAs 물질계를 이용한 상온 연속 발진 특성은 거의 보고된 바 없다 [9-12]. GaAs/AlGaAs 물질계에서 상온 연속 발진이 어려운 이유로 여러 가지가 있겠지만, 높은 문턱전류도 중요한 이유 중의 하나로 이해된다. 높은 문턱전류는 결과적으로 광으로 변환되지 않은 에너지를 증가시키는데, 증가된 에너지는 열로 소모되어 그 열에 의한 레이저 다이오드의 성능 감소로 이어지기 때문이다.

본 연구는 ridge를 형성하는 mesa의 깊이를 깊게 식각함으로써 GaAs/AlGaAs 물질계를 이용한 양자폭포레이저의 문턱전류를 감소시킨 내용한 관한 것이다. 발광이 일어나는 활성영역까지 깊게 식각한 경우 문턱전류 밀도를 26 kA/cm²에서 13.2 kA/cm²까지 감소할 수 있었다.

II. 실험

Molecular beam epitaxy (MBE)법을 이용하여 GaAs/AlGaAs 물질 시스템의 양자폭포레이저 구조를 성장하였다. 에피구조는 상온에서 pulse 모드로 동작한 Page 등에 의한 GaAs/AlGaAs 구조를 이용하였다 [12]. 양자폭포레이저를 개발하기 위해서는 i) sub-nm 수준의 두께 정밀도를 가진 에피층 설계 기술 [13], ii) sub-nm 수준으로 에피층의 두께를 정밀하게 조절할 수 있는 성장기술의 확보가 중요하다. 만일 이 두 개의 기술을 동시에 확보하지 못 할 경우 문턱전류의 증가, 발진의 어려움 등과 같은 문제점이 발생하였을 때 그 문제점에 대한 원인을 정확히 진단하기 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 실험하면서 발생할 수 있는 문제점을 가능한 배제하기 위하여 이미 잘 알려져 있고 성능이 우수한 기존의 구조를 그대로 활용하였다.

* [전자우편] hikoel@kist.re.kr

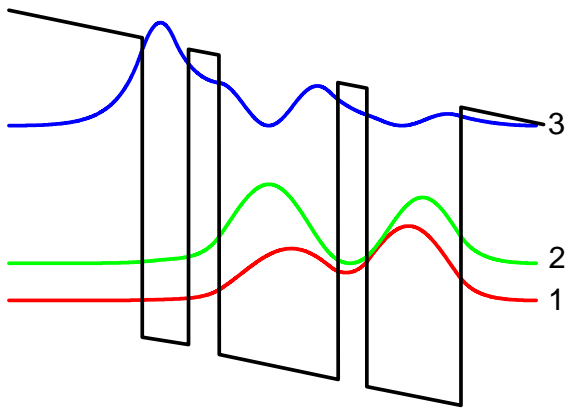


Fig. 1 Energy band structure of active layer and the wave functions confined by it.

양자폭포레이저는 일반적으로 전자가 주입되는 주입층 (injector)과 부밴드 전이 및 밀도 반전이 일어나는 활성층 (active layer)이 1쌍을 이루는데 이 주입층과 활성층으로 이루어진 쌍이 25-75번 반복되는 구조로 이루어져 있다 [9-12]. 본 연구에서 성장된 Page 등에 의하여 보고된 에피구조는 주입층으로 3.4, 1.7, 3.0, 1.8, 2.8, 2.0, 3.0, 2.6, 3.0, 4.6 nm, 활성층으로 1.9, 1.1, 5.4, 1.1, 4.8, 2.8 nm 순으로 이루어 졌다. 여기에서 볼드체는 Al_{0.45}Ga_{0.55}As 장벽층이고 일반층은 GaAs 양자우물층이다. 밑줄 친 부분은 GaAs 우물층의 경우 n=8x10¹⁷/cm³으로, Al_{0.45}Ga_{0.55}As 장벽층의 경우 n=4x10¹⁷/cm³으로 도핑된 것을 의미한다. 성장은 2~3x10¹⁸/cm³으로 도핑된 n-GaAs 기판 위에서 이루어졌고, 성장속도는 GaAs의 경우 0.104 nm/s, AlGaAs의 경우 0.085 nm/s 였다. 활성층과 주입층으로 이루어진 쌍은 40번 반복 성장 되었다. Fig. 1은 성장된 양자폭포레이저의 활성층에 대한 에너지 밴드구조 및 그에 따른 전자의 파동함수를 나타낸 것이다.

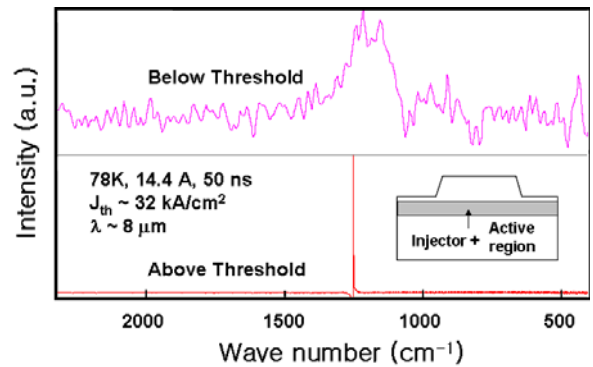
성장된 에피구조는 반도체 레이저 다이오드를 만드는 통상의 공정과정을 거쳐 양자폭포레이저로 제작되었다. 공정은 mesa 식각, 절연막 증착 및 opening, p-metal 증착, thinning, n-metal 증착 순으로 진행되었다. Meas 식각은 GaAs와 AlGaAs에 대한 선택적 식각 특성이 잘 나타나지 않은 citric acid:H₂O₂=10:1로 혼합된 용액을 이용하였으며, i) 발광이 일어나는 영역 위까지 식각한 경우 (shallow mesa QCL: SM QCL)와, ii) 발광이 일어나는 영역까지 식각한 경우 (deep mesa QCL: DM QCL)로 이루어졌다. Ridge의 폭은 30 μm로 고정하였다. 절연막은 plasma

enhanced chemical vapor deposition로 증착된 SiO₂ 박막 (두께: 약 300 nm)를 이용하였다. 전류를 인가하기 위한 금속으로 p-metal은 Ti/Pt/Au (30 nm/30 nm/300 nm)를, n-metal은 AuGe/Ni/Au (30 nm/ 30 nm/300 nm)를 이용하였다.

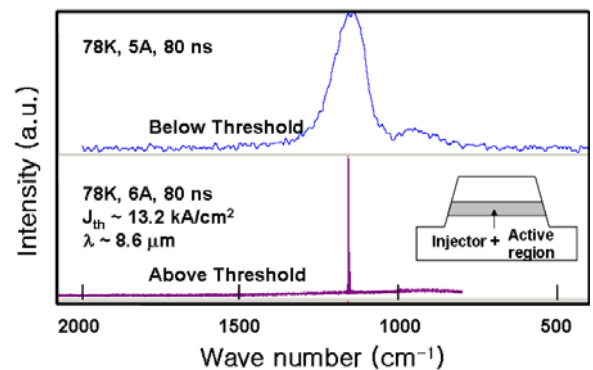
제작된 양자폭포레이저 칩을 cryostat에 장입하여 칩의 온도를 78 K가 되게 유지한 후 pulse 모드로 칩에 전류를 인가하면서 발광시키었다. 발광된 빛은 분광기로 보내져서 분광되었고, 분광된 광을 다시 77 K로 냉각된 MCT 검출기로 검출하면서 전류에 따른 분광특성을 조사하였다. 측정 에 사용된 칩의 길이는 모두 1.5 mm 이었다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 SM QCL과 DM QCL에 대한 분광특성을 나타낸 것이다. 여기서 주의 할 점은 SM QCL



(a) Shallow mesa QCL



(b) Deep mesa QCL

Fig. 2. Electroluminescence characteristics of GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers

과 DM QCL이 비록 동일한 에피구조이기는 하나 성장은 따로 이루어 졌다는 것이다. SM QCL의 경우 인가된 전류의 펄스 폭은 50 ns 이었고, 펄스의 반복율은 5 kHz 이었다. DM QCL의 경우 전류의 펄스 폭은 80 ns 이었고, 반복율은 동일하게 5 kHz 이었다. SM QCL 칩의 경우 인가전류가 14 A에 이를 때까지는 파수 1000~1300 cm^{-1} 사이에서 넓게 분포된 발광특성을 보이다가 14 A (문턱전류밀도: 약 32 kA/cm^2) 보다 커지면서 발진하는 특성을 보여준다. 이때 발진파장은 8 μm 근처에서 일어났다. 한편 DM QCL의 경우 인가전류가 6 A 이하에서는 역시 파수 1000~1300 cm^{-1} 사이에서 넓게 분포된 발광특성을 보이다가 6 A (문턱전류밀도: 약 13.2 kA/cm^2) 이상에서 발진하는 특성을 나타내었다. 이때의 발진 파장은 약 8.6 μm 이었다.

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 성장된 에피구조는 Page 등에 의하여 보고된 구조를 이용한 것이다 [12]. Page 등에 의하여 보고된 양자폭포레이저의 발진파장인 9 μm 와 비교하여 볼 때, 본 연구에서 얻어진 발진파장은 청색편이 하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 성장된 에피층의 두께가 기대했던 값보다 얇게 성장되었으며, 특히 SM QCL이 DM QCL의 에피구조보다 더 얇게 성장되었음을 의미하며 이에 대한 자세한 분석은 추후 따로 발표될 것이다.

한편, Fig. 2에서 나타난 바와 같이 SM QCL과 DM QCL 사이에 문턱전류의 차이가 대단히 큰 것을 알 수 있다. 물론 그림에 나타난 두 QCL의 경우 동일한 에피구조이나 같은 기관에서 제작된 칩을 비교한 것이 아니기 때문에 문턱전류의 차이가 생길 수 있는 가능성은 충분하다. 그러나 DM QCL 제작에 사용된 그 기관으로 SM QCL과 같이 얇게 mesa를 형성하여 제작한 QCL의 경우에도 문턱전류밀도가 26 kA/cm^2 로서 32 kA/cm^2 의 SM QCL과 큰 차이가 나지 않은 반면 13 kA/cm^2 인 DM QCL과는 대단히 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 이는 성장에 따른 차이보다는 칩의 구조에 의한 차이가 문턱전류에 더 크게 작용함을 의미한다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 제작된 SM QCL과 DM QCL의 SEM 단면 사진을 나타낸 것이다. SM QCL의 경우 Fig. 3의 (a)에 나타난 바와 같이 주입된 전류의 일부분이 활성층과 주입층으로 이루어진 지역으로 들어가지 않고 측면 방향으로 손실될 가능성이 큰 것으로 판단된다. 반면 DM QCL의 경우 Fig. 3의 (b)에 나타난 바와 같이 주입된 전류가 측면 방향으로 손실될 가능성은 적고 대부분 활성층과

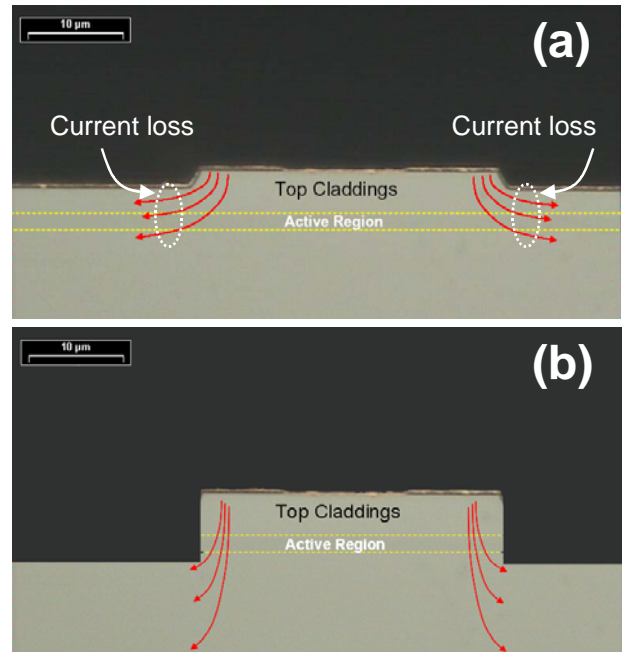


Fig. 3. Cross-sectional SEM images of (a) shallow mesa QCL and (b) deep mesa QCL

주입층으로 이루어진 발광영역으로 주입될 것으로 판단된다. DM QCL이 SM QCL보다 문턱전류가 낮은 것은 이와 같이 측면 방향으로의 전류 손실이 적기 때문으로 이해 할 수 있다.

Fig. 4은 DM QCL에서 발진 한 후의 레이저 스펙트럼을 확대하여 측정한 것이다. 보통의 반도체 레이저 다이오드와 마찬가지로 Fabry-Perot 공진에 의한 여러 개의 모드

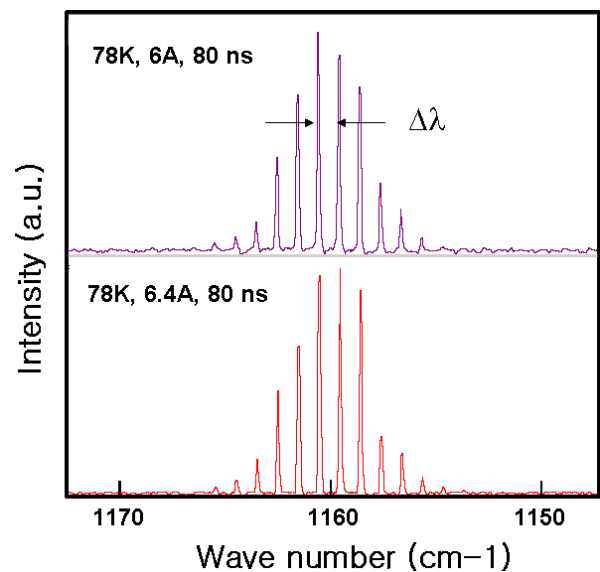


Fig. 4. Lasing spectra of deep mesa QCL

가 파수 1160 cm^{-1} 를 중심으로 나타나고 있다. 문턱전류인 6.0 A 및 6.4 A에서의 공진 모드는 동일한 파장에서 일치하고 있다. 발진 스펙트럼에서 피크 사이의 간격은 약 1 cm^{-1} 인 것으로 측정되었으며, 이것을 파장으로 변환하면 $7.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 가 된다. 한편 Fabry-Perot 모드에 의한 피크 사이의 간격은 $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln}$ (여기에서 $\Delta\lambda$: 피크 간격, λ : 발진파장, L: 레이저 다이오드의 길이, n: 굴절률)에 의하여 결정된다. 이 식에 본 연구에서 사용된 DM QCL의 길이 1.5 mm, 굴절률 3.2, 파장 $8.6 \mu\text{m}$ 를 대입하면 피크 사이의 간격 $\Delta\lambda = 7.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 인 값을 얻을 수 있으며 이는 Fig. 3에서 실험적으로 얻어진 값 $\Delta\lambda = 7.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 과 매우 근사함을 알 수 있다. 이와 같은 특성은 본 연구에서 제작된 양자폭포레이저가 레이저로서 잘 발진하였음을 설명하는 또 다른 근거라고 할 수 있다.

IV. 결 론

기준에 잘 알려진 GaAs/AlGaAs 물질계를 기반으로 양자폭포레이저를 제작하였다. 동작온도 78 K에서 성공적으로 발진되었음을 확인하였고, 발진파장은 $8.6 \mu\text{m}$ 로서 측정되었다. 얇게 식각된 shallow mesa형 양자폭포레이저의 경우 문턱전류 밀도가 $26\text{--}32 \text{ kA/cm}^2$ 이었지만 활성층까지 식각된 deep mesa형 양자폭포레이저의 경우 문턱전류 밀도는 13 kA/cm^2 로 대단히 감소되었다. Deep mesa 구조에서의 문턱전류 감소는 측면 방향으로의 전류 손실이 감소되었기 때문으로 설명되었다.

감사의 글

본 논문은 2007년 과학기술부의 재원으로 국제과학기술 협력재단의 지원 (No. M60605000007)과 산업자원부 민군겸용기술사업의 지원을 받아 수행된 연구임. 저자들은 또한 분광특성을 측정하여주신 Raffaele Colombelli 박사에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] N. Suzuki and N. Iizuka, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L1006 (1997).
- [2] C. Gmachl, H. M. Ng, and A. Y. Cho, Appl. Phys. Lett. **77**, 334 (2000).
- [3] K. Kishino, A. Kikuchi, H. Kanazawa, and T. Tachibana, Appl. Phys. Lett. **81**, 1234 (2002).
- [4] M. Rochat, L. Ajili, H. Willenberg, J. Faist, H. Beere, G. Davies, E. Linfield, and D. Ritchie, Appl. Phys. Lett. **81**, 1381 (2002).
- [5] G. Scalari, L. Ajili, J. Faist, H. Beere, E. Linfield, D. Ritchie, G. Davies, Appl. Phys. Lett. **82**, 3165 (2003).
- [6] B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu and J. L. Ren, Electron. Lett. **40**, 431 (2004).
- [7] A. A. Kosterev, R. F. Curl, F. K. Tittel, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, Appl. Opt. **39**, 4425 (2000).
- [8] A. A. Kosterev and F. K. Tittel, IEEE J. Quantum. Electron. **38**, 582 (2002).
- [9] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, Science, **264**, 553 (1994).
- [10] M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilegems, E. Gini, and H. Melchior, Science, **295**, 301 (2002).
- [11] A. Evans, J. S. Yu, J. David, L. Doris, K. Mi, S. Slivken, and M. Razeghi, Appl. Phys. Lett. **84**, 314 (2004).
- [12] H. Page, C. becker, A. Robertson, G. Glastre, V. Ortiz and C. Sirtori, Appl. Phys. Lett. **78**, 3529 (2001).
- [13] 이혜진, Cheng Ming Lee, 한일기, 이정일, 김문덕, J. Kor. Vac. Soc. **16**, 273 (2007).

Threshold Current Reduction of GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Laser due to the Deep Mesa Structure

Il Ki Han, Jin Dong Song, and Jung Il Lee

Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

(Received September 23, 2008, Revised October 16, 2008, Accepted November 9, 2008)

GaAs/AlGaAs based quantum cascade lasers were fabricated with two different types of i) the shallow mesa type which was etched up to above active region and ii) the deep mesa type which was etched through active region. While the threshold current density of shallow mesa type was 26-32 kA/cm², the one of deep mesa type was reduced drastically up to 13 kA/cm². Such lowered threshold current density at deep mesa type attributed to the reduction of current loss to the lateral directions.

Keywords : Quantum cascade lasers, Quantum well, Threshold current

* [E-mail] hikoel@kist.re.kr