≪연구논문≫ 한국진공학회지 제16권 5호, 2007년 9월, pp.353~358

Trench 구조를 이용한 단일모드형 고휘도 발광소자의 광출력 증가

유영채 · 한일기* · 이정일

한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울 136-791

(2007년 9월 14일 받음)

기저준위의 중심 피크가 1.3 ㎛인 다층 양자점 구조를 사용하여 트렌치 구조를 가진 J-형태의 고휘도 발광소자 (superluminescent diodes)를 제작하였다. 도파로와 트렌치 구조 사이의 간격이 좁아지면서 광출력이 최대 20배까지 증가하였음을 확인하였다. 전류의 증가에 의한 EL 피크 측정결과 트렌치 구조를 가진 경우에 여기준위의 피크가 기저준위의 피크보다 수 십배 증가하는 것을 확인하였고, 이로부터 트렌치 증가에 의한 광출력의 증가는 양자점의 여기준위에 의한 것으로 판단하였다.

주제어 : 고휘도 발광소자, J-형태, 양자점, 트렌치 구조

Ⅰ. 서 론

고휘도 발광소자 (superluminescent diodes, SLD)는 파장대역폭이 넓고 동시에 광출력이 큰 반도체 광원이다. 파장대역폭이 넓다는 점에서 발광다이오드 (ligth emitting diodes, LED)와 유사하고, 광출력이 높다는 점에서 레이저 다이오드 (laser diodes, LD)와 유사한 LED와 LD의 중간 형태의 광원이라고 할 수 있다. SLD는 크게 i) optical coherence tomography (OCT), ii) 광섬유 자이로스코프, iii) 파장분할 광통신 시스템 등에서 핵심 광원으로 응용가능하다 [1-3].

SLD 연구에서의 중요 관심사는 주로 파장대역폭을 증가시키는 것과 광출력을 증가시키는 것으로 요약할 수 있다. 파장대역폭을 증가시키기 위해서는 반도체의 에너지 밴드갭을 조절하는 밴드갭 엔지니어링 기술이 필요한데, 활성영역에서 양자우물의 두께를 변화시키는 chirping 구조는 양자우물 기반의 SLD 연구에서 파장대역폭을 증가키는 대표적인 방법이라 할 수 있다. 이와 같은 chirping 구조를 사용하여 파장대역폭이 91 nm (중심파장 : 0.8 ㎛)인 GaAs/AlGaAs 기반 SLD가, 파장대역폭이 60 nm (중심파장: 1.55 ㎛)인 InGaAsP/InP 기반 SLD가 보고되었다 [4, 5]. Chirping 구조 없이 단순히 p-영역에 고농도 도핑구조를 삽입하여 파장대역폭을 130 nm까지 증가시킨 연구결과도 보고되었다 [6].

최근에는 양자점 (quantum dot: QD)을 이용한 SLD 연구가 많은 주목을 받고 있다. InAs 양자점을 이용하여 파장대역폭이 80nm인 양자점 SLD가 처음으로 보고된 이후 chirping 구조를 가진 양자점 SLD 연구도 진행되었다 [7-11]. Ray 등과 Li 등은 각각 5개의 InxGa1-xAs (각각 x=0.12~0.15, x=0.09~0.15)를 사용하여 파장대역폭이 각각 85 nm와 121 nm인 chirping 양자점 SLD를 보고하였다 [9, 10].

이와 같이 SLD에 관한 연구는 대부분 파장대역폭을 증가시키는 방향으로 이루어졌고, 어느 정도 성과를 거둘 수 있었지만 광출력을 증가시키는 연구는 상대적으로 적었다고 할 수 있다. 본 연구에서는 기존에 개발된 J-shaped SLD에서 도파로 주위에 트렌치 (trench) 구조를 새로 적용함으로서 파장의 변화에 기인한 방사손실 (또는 bending 손실)을 최소화하였고, 이로부터 SLD에서의 광출력을 증가시킨 결과를 보고한다.

Ⅱ. 이론적 배경

일반적으로 레이저 다이오드에서 광출력을 증가시키기 위한 가장 쉬운 방법은 도파로의 폭을 증가시키는 것이다. 그러나 단순히 도파로의 폭을 증가시키면 도파로 내에 기본모드 (fundamental mode)외에 고차모드 (higher mode)도 형성되어 도파된 광은 가우시안 분포가 아닌 여러 모드가 합쳐진 비가우시안 분포를 이루게 된다. 이와 같이 비가우

* [전자우편] hikoel@kist.re.kr

시안 분포의 광은 광섬유와의 결합효율 감소 등 사실상 응용에서 많은 제약을 받게 된다. 아래의 식 (1)은 도파로에서 단일모드인 광을 유도하기 위한 조건을 나타낸 것이다.

$$k_0 w (n_w^2 - n_c^2)^{1/2} \leq \pi \quad (1)$$

여기에서 k_0는 공기중에서의 파수벡터, w는 도파로의 폭, n_w는 도파로 영역에서의 굴절률이고, n_c는 도파로 영역이 아닌 영역에서의 굴절률이다. 따라서 광출력을 증가시키면서 (즉 w를 증가시키면서) 기본모드를 유지시키기 위해서는 도파로 영역에서의 굴절률 (n_w)과 도파로가 아닌 영역에서의 굴절률(n_c) 차이가 작아져야 하는데 이는 도파로를 구성하는 ridge의 깊이가 얕아지는 것을 의미하게 된다.

일반적으로 레이저 다이오드처럼 도파로가 직선일 경우 위와 같이 도파로의 폭을 넓히면서 깊이를 얕게하는 것은 광손실에 있어서 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 그림 1의 (a)에 나타낸 J-형태를 가진 SLD (일반적인 구조)의 경우 굴절률의 차이가 크지 않으면 구부러진 부분에서 광손실이 커지게 되고 이는 광출력을 증가시키려는 당초 목적과 일치하지 않게 된다. 그림 1의 (b)는 본 연구에서 제안하는 것으로서 구부러진 부분에서의 광손실을 적게 하기 위하여 구부러진 부분 주위에 트렌치 구조를 적용한 J-형태의 SLD를 나타낸 것이다. 그림 1의 (b)의 아래부분에 나타낸 그림은 위부분에 대한 단면도를 나타낸 것인데 트렌치 영역이 도파로 영역보다 더 낮은 굴절률을 제공함으로서 구부러진 부분을 통하여 빠져나오려는 광을 도파로 중심으로 밀어주는 역할을 하게되고 따라서 광출력이 증가될 것으로 기대된다.

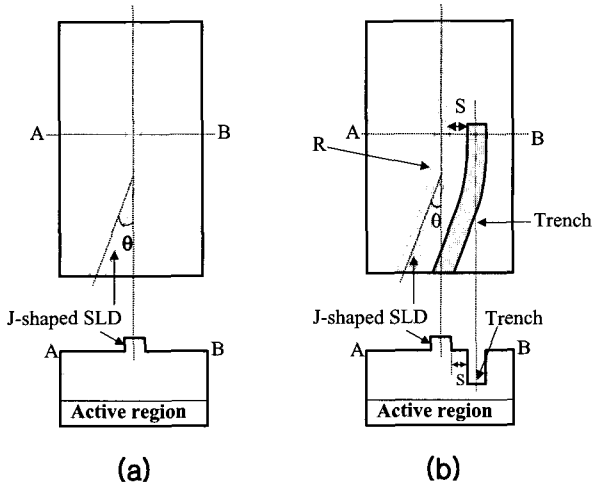

그림 1. 일반적인 J-형태의 SLD 및 단면도 (a)와 트렌치 구조를 가진 J-형태의 SLD 및 단면도 (b)

Ⅲ. 실 험

그림 2는 SLD 제작을 위하여 사용된 InAs/GaAs 양자점 에피구조 및 에너지 밴드 구조를 나타낸 것이다. 에피구조는 독일 회사인 Innolume로부터 구입하였다. 활성 영역은 5층의 양자점 층으로 구성되어 있고, 양자점 활성 영역을 중심으로 n 영역과 p 영역에는 GaAs/AlGaAs 초격자 구조로 성장되어 있다. 이들 초격자층은 1.5 ㎛ 두께의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 클래딩층으로 싸여 있으며, p 클래딩층 위쪽에 고농도로 도핑된 400 nm 두께의 p^+-GaAs층이 성장되어 있다. 활성 영역은 0.8 nm 두께의 InAs 양자점 층과 2 nm 두께의 InGaAs 변형 완화층, 38 nm 두께의 GaAs 장벽층으로 구성되어 있다.

SLD를 제작하기 위하여 본 연구에서 설계된 트렌치 구조 SLD의 제원은 다음과 같다. 도파로의 폭은 6 ㎛이고, 구부러진 도파로는 직선도파로와 6.5도의 각도로 구성되어 있다. 여기에서 각도 6.5도를 만들기 위해서 구부러진 도파로가 완만하게 구부러져야 하는데 본 연구에서는 반경이 3.5 mm인 원호를 따라서 구부러지게 하였다. 도파로와 트렌치 사이의 거리는 S이며 트렌치 효과를 확인하기 위하여 2, 4, 6, 8 ㎛로 변화시키었다. 트렌치의 폭은 20 ㎛이고, 깊이는 1.2 ㎛이었다. 이와 같은 트렌치 구조는 트렌치 영역과 트렌치가 없는 영역 사이에 굴절률 차이 0.012를 만들어 준다. SLD 제작공정은 통상의 ridge형 반도체 레이저 다이오드 제작과정과 동일하며, 단지 트렌치 구조를 형성

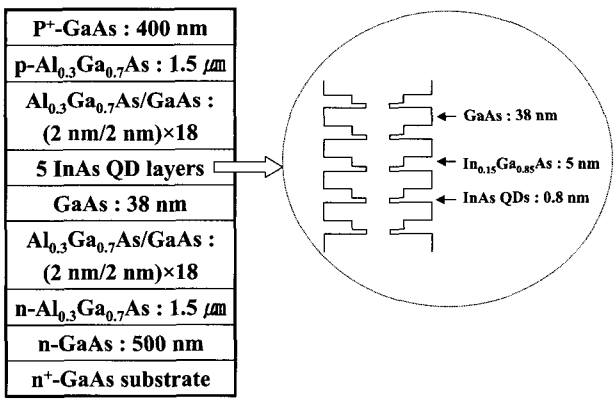

그림 2. InAs/GaAs 양자점 에피구조 및 에너지 밴드 구조

하기 위한 공정이 추가될 뿐이어서 다음과 같이 간략하게 설명하기로 한다. J-형태 도파로는 표준 리소그래피 과정을 거쳐 p^+-GaAs를 식각한 후 계속해서 클래딩층인 p-$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$를 0.7 ㎛를 식각하여 형성되었다. 트렌치 구조는 다시 표준 리소그래피 과정을 거쳐 남아있는 p-$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 클래딩층을 식각하여 만들어 졌다. 이후 절연막으로 SiO_2를 약 0.3 ㎛ 증착하고 리소그래피 공정을 통하여 식각되지 않은 p^+-GaAs 층 위에 있는 SiO_2 절연막을 노출 시키고 노출된 SiO_2 절연막을 제거하여 p^+-GaAs 층이 노출되도록 하였다. 노출된 p^+-GaAs 층 위에 p-오믹을 위하여 Ti/Pt/Au 금속을 각각 30 nm/30 nm/300 nm의 두께로 증착한 후 425 ℃에서 1분간 열처리하였다. 다음으로 기판의 두께가 120 ㎛가 되도록 연마한 후 n-오믹을 위하여 AuGe/Ni/Au 금속을 각각 30 nm/30 nm/300 nm의 두께로 증착한 후 다시 385 ℃에서 1분간 열처리하였다. 제작된 소자는 Cu 마운터에 마운팅하고 열전소자 (thermo-electric cooler: TEC)로 온도를 조절하여 광출력, 스펙트럼 등의 특성을 측정하였다. 한편 비교를 위하여 트렌치가 없는 J-형태 SLD도 동일한 조건에서 함께 제작하였다.

Ⅳ. 결과 및 논의

그림 3은 상온 연속동작으로 측정된 것으로서 여러 가지 트렌치 위치 (그림 1의 (b)에서 S)를 변화시키었을 때 주입전류에 대한 J-형태 SLD의 광출력 특성을 보여준다. 측정된 모든 소자의 총 길이는 2.5 mm로서 직선도파로 영역이 1 mm, 구부러진 영역이 1.5 mm 이었다. 트렌치 위치에 상관없이 같은 길이를 갖는 J-형태의 SLD는 주입전류에 대한 전류밀도는 같게 된다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 트렌치 위치가 도파로에 가까이 위치할수록 광출력은 커짐을 알 수 있고, 비교를 위하여 함께 제작된 트렌치 구조가 없는 J-형태 SLD에서의 광출력 특성은 트렌치 위치가 8 ㎛인 J-형태 SLD의 광출력보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

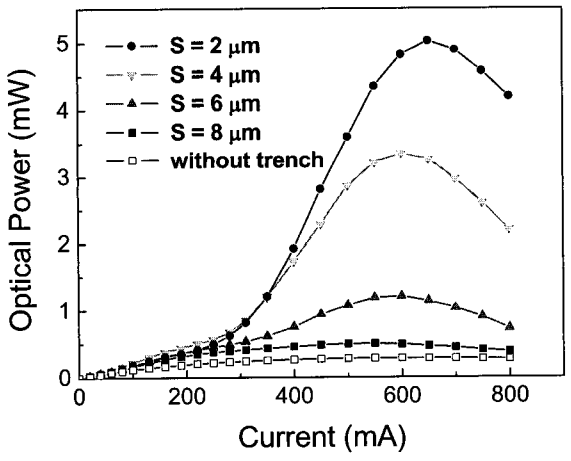

그림 3. 주입 전류에 대한 SLD 광출력의 트렌치 위치 (S) 의존성

트렌치가 없는 것과 비교하여 트렌치가 있는 경우 트렌치의 위치에 따라 광출력은 2~20 배까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 트렌치 구조가 구부러진 도파로 영역에서 광손실을 감소시키었기 때문임을 명확하게 설명하고 있다.

그림 4는 상온에서 측정된 SLD의 electroluminescence

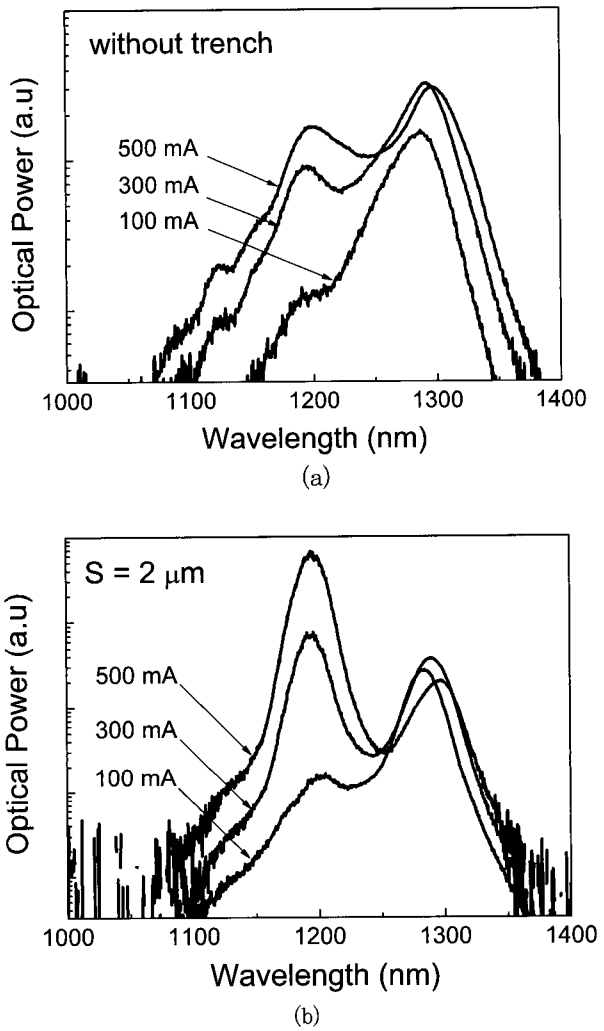

그림 4. 트렌치 구조가 없는 J-형태 SLD (a) 및 트렌치 구조를 가진 J-형태 SLD (b)의 EL 특성

(EL) 스펙트럼 특성을 나타낸 것이다. 트렌치 구조의 존재 유무에 관계 없이 전류의 증가에 따라 1.3 ㎛ 근처와 1.2 ㎛ 근처에 중심을 가진 두 개의 피크가 나타남을 볼 수 있다. 본 논문에서는 나타내지 않았지만 photoluminescence (PL) 측정 결과에서도 2개의 피크가 측정되었다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 전류의 증가에 따라 1.2 ㎛ 근처에 중심을 둔 피크의 세기가 증가하는 현상은 여기준위가 나타내는 전형적인 특성이다. 따라서 1.3 ㎛ 근처에 중심을 둔 피크는 활성영역인 양자점의 기저준위에 의한 것이고, 1.2 ㎛ 근처에 중심을 둔 피크는 양자점의 여기준위에 기인된 것으로서 판단할 수 있다 [12]. 한편 전류의 증가에 따라 여기준위에 의한 피크의 세기가 증가한다고 하더라도 통상적인 레이저 다이오드와 같이 발진하는 모습은 관찰되지 않았다. 이는 본 연구에서 제작된 트렌치 구조를 가진 J-형태 SLD가 레이저로서 발진하지 않음을 의미한다.

앞에서 언급한 바와 같이 비록 그림 4의 (a)와 (b)는 전류의 증가에 따라 여기준위에 의한 피크가 증가하는 모습을 보여주고 있지만 (a)와 (b)사이에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 트렌치가 없는 그림 4 (a)의 경우 전류의 증가에 따라 여기준위에 의한 피크가 증가하지만 기저준위에 의한 피크보다 우세하게 나타나지는 않는다. 반면 트렌치가 있는 그림 4의 (b)의 경우 전류에 따른 여기준위의 피크는 기저준위에 의한 피크보다 우세하게 나타남을 알 수 있다. 또한 본 논문에서는 나타내지 않았지만 도파로와 트렌치의 간격 (S)이 좁아질수록 전류에 따른 여기준위의 피크가 점점 우세해가는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 상황을 그림 3의 특성, 즉 트렌치가 있는 구조에서 S가 좁아질수록 광출력이 증가하는 현상과 연관하여 생각하면 트렌치 구조에서 광출력의 증가에 기여하는 요소는 양자점에서의 여기준위에 의한 것으로 판단할 수 있다. 이는 도파로를 구성하는 매질 내에서 파장에 대한 굴절률 변화(도파로 분산), 즉 파장이 짧아질수록 도파로 영역에서의 굴절률과 도파로가 아닌 영역에서의 굴절률차이가 더욱 작아짐을 감안할 때 1.2 ㎛의 여기준위에 의한 광은 1.3 ㎛의 기저준위에 의한 광보다 도파로의 굽어짐에 의한 광손실은 더욱 클 것이며 트렌치가 없는 경우에 여기준위에 있는 광이 곡선부분을 지나면서 대부분 손실로 작용한다는 것을 의미한다. 또한 그림 1에 나타낸 J-형태의 SLD가 기저준위인 1.3 ㎛에 맞추어 최적화로 설계되었음을 감안할 때 충분히 이해할 수 있는 내용으로 판단된다. 이와 같은 결과들은 트렌치 구조는 파장 대역폭이 넓은 SLD에 더욱 적합하며, 밴드갭 엔지니어링을 하지 않은 단순 다층양자우물와 같이 연속 에너지 밴드를 가진 경우, 즉 전류 또는 광펌핑에 따라 기저준위에서 여기준위로의 여기가 거의 일어나지 않은 경우에는 트렌치 구조가 광 출력 증가에 크게 기여하지 않을 수 있음을 의미한다고 할 수 있다. 이에 대한 실험적 결과는 현재 진행 중이다.

V. 결 론

기저상태의 중심 피크가 약 1.3 ㎛인 다층 양자점 구조로 J-형태의 SLD를 제작하였다. 트렌치 구조가 있는 경우에 광출력이 증가하였으며, 도파로와 트렌치와의 간격이 좁아질수록 광출력의 증가 현상이 두드러지게 나타났다. EL 측정 결과 트렌치가 없는 SLD의 경우, 전류의 증가에도 기저준위의 피크가 우세한 반면, 트렌치가 있는 SLD의 경우 전류의 증가에 따라 여기준위의 피크가 기저준위의 피크보다 수 십배 증가하는 것을 알 수 있었고, 이로부터 트렌치 구조에서의 광출력 증가는 여기준위에서의 피크 증가 때문에 기인한 것으로 판단하였다. 트렌치 구조의 효과는 넓은 파장대역폭을 갖고 구부러진 도파로 영역을 포함하는 SLD에 적합하며, 연속에너지 밴드구조를 갖는 양자우물 보다는 불연속 에너지 밴드구조를 갖는 양자점 구조에 더 적합함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 과학기술부의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원 (No. M60605000007)과 KIST 기관고유사업 (2E19090)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

[1] J.M. Schmitt, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. **5**, 1205 (1999).

[2] W. Burns, C.L. Chen, and R. Moeller, J. Lightwave Technol. **1**, 98 (1983).

[3] D.D. Sampson and W.T. Holloway, Electron. Lett. **30**, 1611 (1994).

[4] C.F. Lin and B.L. Lee, Appl. Phys. Lett. **71**, 1598 (1997).

[5] T. Yamatoya, S. Mori, F. Koyama, and K. Iga, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 5121 (1999).

[6] J.H. Song, S.H. Cho, I.K. Han, Y. Hu, P.J.S. Heim, F.G. Jhonson, D.R. Stone, and M. Dagenais, IEEE Photon. Technol. Lett. **12**, 783 (2000).

[7] D.C. Heo, J.D. Song, W.J. Choi, J.I. Lee, J.C. Jung, J.I Lee, and I.K. Han, Electron. Lett. **39**, 863 (2003).

[8] I.K. Han, D.C. Heo, J.D. Song, J.I. Lee, and J.I. Lee, J. Kor. Phys. Soc. **45**, 1193 (2004).

[9] L.H, Li, M. Rossetti, A. Fiore, L. Occhi, and C. Velez, Electron. Lett. **41**, 41 (2005).

[10] S.K. Ray, K.M. Groom, M.D. Beattie, H.Y. Liu, M. Hopkinson, and R.A. Hogg, IEEE Photon. Technol. Lett. **18**, 58 (2006).

[11] 유영채, 이정일, 김경찬, 김은규, 김길호, 한일기, 한국진공학회지, **15**, 493 (2006).

[12] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoen, and A. Fiore, Appl. Phys. Lett. **82**, 1818 (2003).

≪Research Paper≫ Journal of the Korean Vacuum Society Vol.16 No.5, September 2007, pp.353~358

Optical power enhancement of superluminescent diodes utilizing trench

Young Chae Yoo, Il Ki Han* and Jung Il Lee

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

(Received September 14 2007)

J-shaped superluminescent diodes (SLD) utilizing trench structure have been fabricated on the multiple quantum dots epi-structure with its ground state energy wavelength of 1.3 ㎛. It was observed that optical power was drastically increased up to 20 times in comparison with that of SLD without trench structure. The electroluminescence characteristics showed that the peak intensity of excited state was several ten times higher in the SLD with trench than without trench structure. It is explained that the optical power enhancement of J-shaped SLD with trench structure resulted from the drastic increase of peak intensity of excited state.

Keywords : Superluminescent diodes, J-shape, Quantum dots, Trench structure

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