

선택성장 내부채널 반도체 레이저 다이오드

안형수¹⁾ · 양민¹⁾ · 이삼녕¹⁾ · 정중제²⁾

Selectively Inner-Channeled Semiconductor Laser Diode

H. S. AHN¹⁾ · M. YANG¹⁾ · S. N. YI¹⁾ · J. J. JUNG²⁾

ABSTRACT

The low threshold current and high power selectively inner-channeled laser (SIC LD) was fabricated and estimated by the selective growth using the low-pressure MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) method. The minimum threshold currents in the CW (continuous waves) modes of 8.1mA (cavity=250 μ m) and 12.9mA (cavity=750 μ m) were achieved with a stabilized fundamental mode. We could obtain the maximum output powers with the uncoated facets of 100mW at pulsed width and 50mW at continuous waves condition in 250 μ m cavity length. SIC LD is index-guided laser which has new fabrication techniques different from ridge waveguide structure lasers.

1. 서론

광도파로 층의 유효굴절률 (effective refractive index) 차에 의한 효과와 더불어 내부전류 차단층 (current blocking layer)을 갖는 반도체 레이저 다이오드 구조는 안정된 단일 모드에서의 동작과 낮은 문턱전류의 특성을 얻기 위해 많은 연구의 대상이 되고 있다 [1]. 최근에는 초고속 레이저 프린트, 광디스크, 장거리 광통신 등과 같은 광정보 시스템 분야에 적용하기 위해서 높은 출력 특성이 요구되고 있다 [2].

대표적인 반도체 레이저 다이오드 구조는 VSIS (v-channeled substrate inner stripe)구조 [3], SAS (self-aligned structure) [4], BR (buried ridge) 구조 [5], HBB (hetero barrier blocking) 구조 [6] 등이 있으며, 많은 연구가 진행되고 있다. 한편 MOCVD, MBE (molecular beam epitaxy) 등의 에피성장 방법은 선택 성장과 같은 새로운 기술을 용이하게 하였으며, 그 결과 새로운 형태의 III-V, II-VI족 반도체 소자 제작이 가능하게 되었다.

선택 성장방법은 OEIC (opto-electronic integrated circuits) 소자와 같이 한 기관 내에 광-전자소자의 집적 회로를 만들기 위해 이용될 수 있다 [7]. 선택 성장방법은 기관 위에 형성된 유전체 마스크의 창, 혹은 채널 등의 부분에만 결정을 성장하여 필요한 모양의 에피층을 형성하는 매우 편리한 기술이다. 따라서 단일 소자로서의 반도체 LD 분야에도 그 적용의 가능성이 연구되고 있다. 일반적으로 유전체 마스크로는 SiO₂ 혹은 Si₃N₄등을 사용하며, 신뢰성이 요구되는 반도체 LD 제작의 경우 이러한 유전체가 접촉된 반도체 층에 미치는 영향을 최소화하여야 한다. 이러한 불순물은 에피층의 무질서화 (disordering) 그리고 평균화 (averaging) 현상을 일으키며, SiO₂ 절연막 또는 Si₃N₄ 절연막 등을 이용할 경우 Si 또는 O의 확산에 의해 발생된다 [8]. 또한 재성장 계면에서의 트랩 (trap) 발생, 나르개 (carrier)의 공핍 또는 축적 그리고 이동도의 감소 등으로 LD의 품질이 악화된다 [9]. 따라서 LD 제작의 경우 광도파로 부분의 선택 성장은 이러한 영향을 최소화하는 구조 및 제작 공정이 반드시 요구된다.

1) 한국해양대학교응용물리학

2) LG 이노텍(주)

본 논문에서는 새로운 에피 성장 기술의 한 분야인 선택 성장 방법을 통해 LD제작 공정 중 제거되는 에피층을 이용하여 새로운 구조의 SIC LD를 제작 평가하고자 한다

2. 실험 방법

저압 MOCVD 방법에 의한 GaAs의 선택 성장은 기판이 (100)일 경우 [011] 방향으로 V-채널을 얻을 수 있다 특히 성장온도 650℃에서 As/Ga mole 비가 50~80일 경우 기판으로부터 55° 정도의 각을 가진 V-채널을 얻을 수 있다 MOCVD 방법에 의한 내부 전류 차단 층을 갖는 대부분의 굴절도파로 구조의 반도체 LD는 전류 차단 층을 성장한 후 습식에칭 혹은 HCl-AsH₃을 이용한 건식에칭으로 전류 주입 홈을 형성한다 그러나 본 논문에서는 이러한 내부 전류 주입 홈을 선택 성장으로 형성시켰으며, 3단계의 에피 성장 과정을 거쳐 LD를 제작하였다 유효굴절계수의 차를 두기 위해 1차 p-cladding 층을 에칭 하여 리지(ridge)를 형성한 후 선택 성장으로 내부 전류 차단 층을 형성하는 RWSAS (ridge waveguide self-aligned structure) [10] LD구조는 광 도파로 부분의 cladding 층을 1차 성장으로 완성하는 반면, SIC LD는 1차 p-cladding 층과 2차 p-cladding 층이 수Å의 GaAs 양자우물 (quantum well)층을 사이에 두고 접합하는 특징이 있다 저압 MOCVD 방법에 의해 750℃에서 Si-doped GaAs 기판을 사용하여 n-GaAs butter 층, Si-doped Al_{0.6}Ga_{0.4}As cladding 층, compositionally graded n-Al_xGa_{1-x}As 층(x=0.6→0.2), undoped GaAs 단일 양자우물 활성층, compositionally graded p-Al_yGa_{1-y}As 층(y=0.2→0.6), Zn-doped Al_{0.6}Ga_{0.4}As cladding 층, GaAs 양자우물 anti-oxide 층, Al_{0.6}Ga_{0.4}As 선택 에칭 층, GaAs anti-diffusion 층을 단계적으로 성장시켰다 1차 성장이 끝난 기판은 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 절연막의 마스크인 Si₃N₄를 300℃에서 200Å 증착한 후, BOE(buffered oxide etchant) 용액으로 5μm폭의 Si₃N₄/GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As stripe를 [011] 방향으로 형성하였다 2차 내부 전류 차단층의 성장은 650℃에서 40Å/min 이상의 높은 성장 비로 Se-doped GaAs 내부 전류 차단 층을 선택 성장하였다.



그림 1. SIC LD의 단면 SEM 사진

Si₃N₄/GaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As stripe를 제거한 후 암모니아계 용액으로 50Å GaAs 양자우물 anti-oxide 층 위에 존재하는 결함들을 제거하여 내부 전류 차단 층의 선택 성장시 발생할 수 있는 Si₃N₄의 영향을 최소화하였다 3차 성장은 700℃에서 Zn-doped Al_{0.6}Ga_{0.4}As 2차 cladding 층, Zn doped GaAs capping 층을 성장하였다 양자우물층과 활성층 및 anti-oxide 층의 두께는 TEM(transmission electron microscope)으로 측정하였으며, 그림 1에서 SIC GRIN (graded-index waveguide separate confinement hetero-structure) - SCH LD의 단면 구조의 SEM 사진을 볼 수 있다 전극은 p와 n-측 ohmic 접촉을 위해 각각 AuZn/Au로 형성하였으며, 250 μm, 500 μm, 750 μm 공진기 (cavity) 폭으로 절단 (cleaving)된 소자들은 Si-submount 위에 p-up 방향으로 조립 (package)하여 측정하였다

3. 특성 평가 및 논의

본 논문의 LD는 단일 양자 우물과 GRIN-SCH를 가진 활성층 구조를 갖고 있다. 먼저 GRIN-SCH 활성층 구조의 특성을 조사하기 위하여 단일 양자 우물의 두께 변화에 따른 GRIN-SCH stripe LD를 제작하였다. 그 결과 활성층의 두께가 70Å일 때 공진기 폭이 1000 μm에서 190 A/cm²의 가장 낮은 문턱전류밀도(J_{th}) 값을 얻었다.

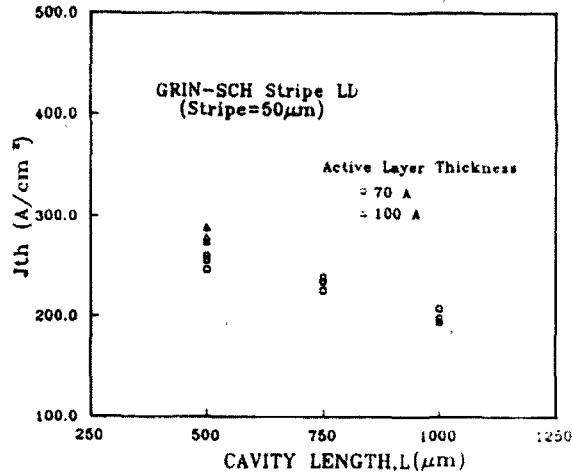


그림 2 GRIN-SCH stripe LD의 단일 양자 우물두께 변화에 따른 J_{th} 특성

그림 2는 70Å, 100Å의 단일 양자 우물 활성층 구조를 갖는 GRIN-SCH stripe LD의 공진기 폭 변화에 따른 J_{th} 특성을 보여준다. 따라서 이 결과를 이용하여 SIC GRIN-SCH LD 활성층의 두께는 70Å으로 고정시켰다. SIC GRIN-SCH LD의 최소 실온 연속발전 문턱 전류 (I_{th}) 는 공진기 폭이 250 μm 일 때 8.1mA의 값을 얻었으며, 효율 (slope efficiency)은 0.45mW/mA이었다. 그림 3에서는 SIC-GRIN-SCH LD의 공진기 폭 변화에 따른 I_{th} 분포를 볼 수 있다. 5μm 도파로 폭을 갖는 공진기 폭 750 μm인 LD에서 12.9mA의 최소 실온 연속발전 문턱전류를 얻었다. 이렇게 매우 낮은 I_{th} 값은 높은 양질의 내부 전류 차단 층이 선택 성장으로 형성되었음을 보여주는 결과이다. 공진기 폭이 250 μm와 750 μm LD의 효율 변화가 거의 없는 것은 높은 양질의 광 도파로가 형성된 것으로 판단된다 (그림 4). 또한 손실을 발생시키는 결합 등이 양자우물 근처에서는 거의 존재하지 않음을 의미한다.

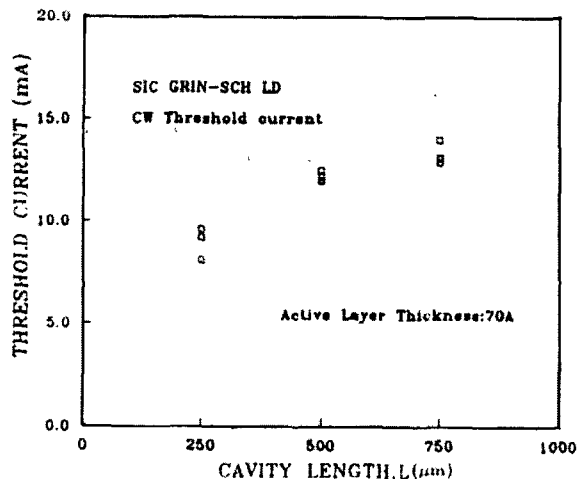


그림 3. SIC GRIN-SCH LD의 공진기 폭 변화에 따른 I_{th} 분포

SIC GRIN-SCH LD의 발광 스펙트럼은 광 출력 30mW 일 때 852.9nm로 안정된 단일모드 특성을 보였다 (그림 5). 또한 광 출력 변화에 따른 스펙트럼에서 50mW 까지 안정된 단일모드를 얻을 수 있었다. 그림 6은 그 특성을 나타내며, 10mW에서 50mW까지의 광 출력 변화에 대한 파장 변화는 250nm 정도였다.

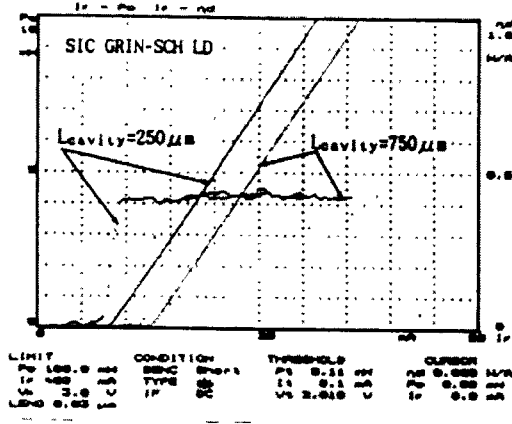


그림 4. 공진기 폭 250 μm과 750 μm SIC GRIN-SCH LD의 효율특성

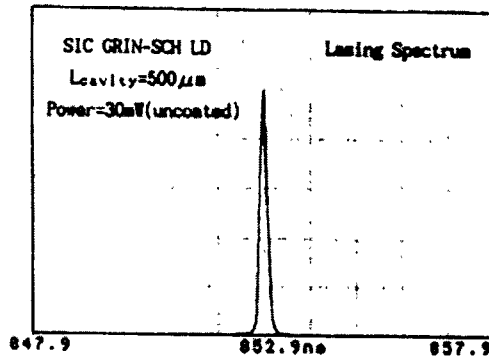


그림 5. SIC GRIN-SCH LD의 발광 스펙트럼

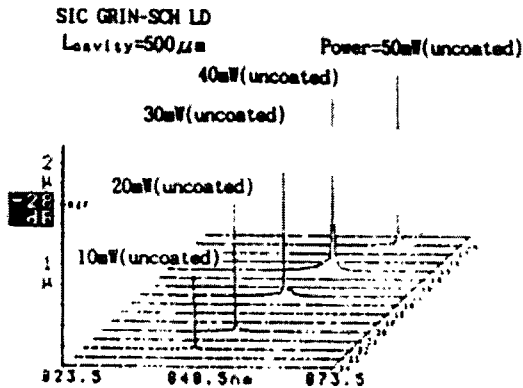


그림 6. SIC GRIN-SCH LD의 광 출력에 따른 발광 스펙트럼

이러한 파장 변화는 출력을 증가시킬수록 실온 연속발진 문턱전류가 증가하므로 LD 내부의 온도가 상승하여 종모드 (longitudinal mode)가 좀 더 긴 파장의 모드로 이동된 결과라고 해석된다.

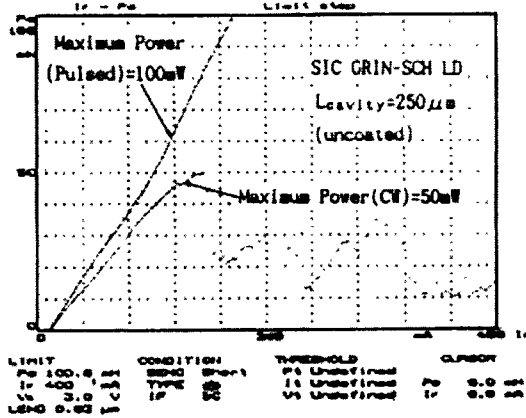


그림 7. SIC GRIN-SCH LD의 광 출력 특성

SIC GRIN-SCH LD의 온도상수 (temperature sensitivity parameter) T_0 는 $10^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 범위에서 145°C 의 특성을 나타내고 있으며 이는 동종의 LD에 비해 매우 좋은 결과라 할 수 있다. 그림 7은 SIC GRIN-SCH LD의 광 출력 특성을 나타내고 있다.

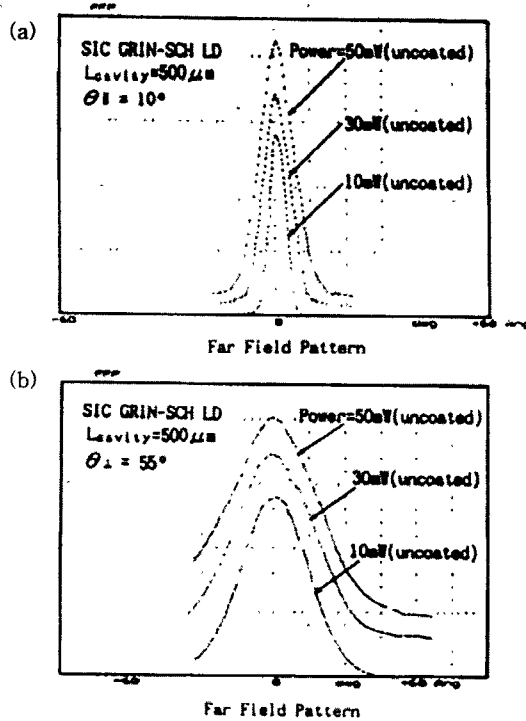


그림 8. SIC GRIN-SCH LD의 FFP 특성

- (a) 접합 면에 평행한 방향의 FWHM($\theta_{||}$)
- (b) 접합 면에 수직인 방향의 FWHM(θ_{\perp})

2 μ sec/step pulsed 조건으로 공진기 폭 250 μ m에서 100mW, 실은 연속발진 조건에서 50mW의 최대 광 출력을 얻을 수 있었다. 이때 반사면 (mirror)은 코팅하지 않았다. 펄스와 실은 연속발진 광 출력은 열에 의해 제한되었다고 생각된다. 그러므로 낮은 문턱전류와 높은 미분양자효율 (differential quantum efficiency)이 더욱 중요하게 요구된다. 한편 50mW까지 kink-free 동작이 가능한 것으로 보아 SIC GRIN-SCH LD에서는 광잡음 (optical noise)의 증가, 빔 방향의 이동 그리고 변조 (modulation) 특성의 악화와 같은 불규칙한 현상들은 없는 것으로 판단된다. 따라서 반사면 코팅 효과와 stripe 폭의 증가 그리고 공진기 폭의 변화에 의한 COD (catastrophic optical damage)의 향상으로 최대출력에 있어서 더 좋은 결과가 기대된다 [3] Far Field Pattern (FFP)의 FWHM (full width at the half maximum, θ)은 접합 면에 평행한 방향으로 10°, 접합 면에 수직인 방향으로 55° 를 얻었다. 또한 50mW 광 출력에서도 안정된 FFP를 얻을 수 있었다 (그림 8). 이를 통해 SIC GRIN-SCH LD는 고출력에 대해서도 안정된 단일 횡모드 (transverse mode) 특성을 가짐을 알 수 있다. 광 출력 30mW에서의 Near Field Pattern (NFP)은 안정된 단일 모드로 접합 면에 평행한 방향으로 5 μ m, 접합 면에 수직인 방향으로 4 μ m의 FWHM 특성을 보여주었고, astigmatism은 7.1 μ m 정도였다 (그림 9).

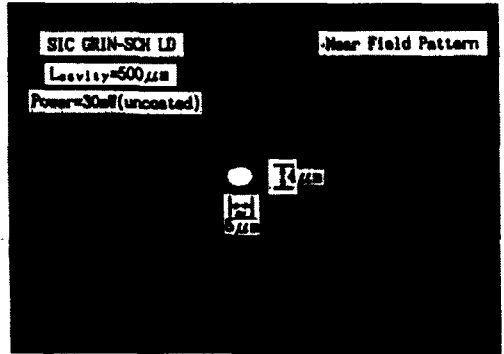


그림 9. SIC GRIN-SCH LD의 NFP 특성

따라서 FFP와 NFP 결과에서 SIC GRIN-SCH LD가 적절한 유효굴절 광 도파로 구조임을 알 수 있다. SIC GRIN-SCH LD의 수명 특성의 조사 (aging test)는 분위기 온도 70°C, 광 출력 20mW (uncoated facets)조건으로 하였다.

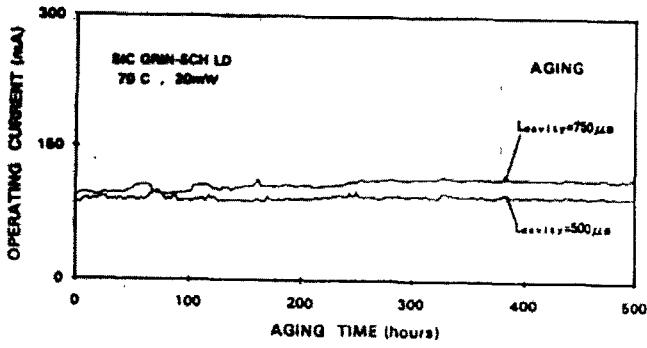


그림 10. SIC GRIN-SCH LD의 aging test 특성

그림 10에서 그 결과를 보여준다. 500시간까지 큰 전류의 증가가 나타나지 않았다. 일반적으로 LD의 heat sink 온도는 상온보다 크며 ($\sim 50^{\circ}\text{C}$), 이러한 고온에서의 결과는 SIC GRIN-SCH LD가 재성장 계면이 선택 성장 후에도 양호한 결정을 가지고 있다고 판단된다.

IV. 결 론

선택 성장에 의해 형성된 내부 전류 차단 층을 갖는 SIC GRIN-SCH LD를 제작 평가하였다. 공진기 폭 $250\mu\text{m}$ (uncoated facets)의 SIC GRIN-SCH LD에서 8.1mA의 최소 상온 연속발진 문턱 전류와 50mW의 상온 광 출력을 얻었다. 또한 절연막의 반도체에 대한 영향을 LD 제작 공정시 최소화하여 안정된 단일모드 동작 및 신뢰성이 뛰어난 특성을 얻었다. 이 결과에 의해 반사면 코팅 등의 방법으로 특성을 향상시킨다면 고품질의 낮은 문턱전류, 고효율 SIC GRIN-SCH LD의 제작이 가능하며, 또한 광전소자의 제작에 중요한 영향을 줄 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kressel, J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LED'S* (Academic Press, London, 1977)
- [2] R. Hiroyama, Y. Nomura, K. Furusawa, S. Okamoto, N. Hayashi, M. Shono and M. Sawada, *Electron. Lett.* **37**, 30 (2001).
- [3] H. C. Ko, M. W. Cho, J. H. Chang and M. Yang, *Appl. Phys.* **A68**, 467 (1999).
- [4] S. Nakatsuka, Y. Ono, T. Kajimura and M. Nakamura, *Proc. 15th Conf. Solid State Devices and Materials Tokyo* (1983).
- [5] H. Fujii, K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, I. Hino, H. Hotta and T. Suzuki, *Electron. Lett.* **23**, 938 (1987).
- [6] K. Itaya, M. Ishikawa, Y. Watanabe, K. Nitta, G. Hatakoshi And Y. Uematsu, *Jpn. J. Appl. Phys* **27**, L2414 (1988).
- [7] C. Wilmsen, H. Temkin and L. A. Coldren, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- [8] D. G. Deppe, L. J. Guido, N. Holonyak. Jr., K. C. Hsieh, R. D. Burnham, R. L. Thornton And T. L. Paoli, *Appl. Phys. Lett.* **49**, 510 (1986)
- [9] L. J. Guido, J. S. Major. Jr., J. E. Baker, N. Holonyak. Jr. And R. D. Burnham, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 1265 (1989).
- [10] S. Yamashita, A. Ohishi, T. Kajimura, M. Inoue And Y. Fukui, *Ieee J. Quantum Electron.*, **QE-25**, 1483 (1989).