

광모드변환기가 집적된 1.3 μm SSC-FP-LD 제작 및 특성 해석

심종인 · 어영선

한양대학교 전자컴퓨터공학부

장동훈

삼성전자 광전자사업부

(2000년 5월 9일 받음, 2000년 6월 21일 수정본 받음)

광가입자용 광원으로서 유망한 모드변환기가 집적된 1.3 μm SSC-FP-LD를 저압 MOVPE결정성장법을 사용해 제작하고 이의 특성을 분석하였다. SSC-LD의 활성영역과 SSC영역은 BJB방법으로 집합하였으며 taper형 도파로 구조를 선택성장법으로 성장하였다. 제작한 SSC-LD의 특성을 측정된 결과 SSC 단면으로 부터의 미분효율 0.23~0.32 mW/mA, FFP의 FWHM 값은 9.5°~12.3°, 단일모드 광섬유와의 광결합 시 추가광결합손실 -1 dB 범위내에서 수평방향으로 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 및 수직방향으로 $\pm 2.3 \mu\text{m}$ 의 정렬오차 허용도 등과 같은 양호한 특성을 얻었다. SSC-LD의 문제점들을 이해하고 SSC-LD의 성능향상에 대한 지침을 얻고자 방사모드를 고려한 SSC-LD특성 해석을 행하였다. 해석결과 SSC-LD에서의 비대칭 광출력특성, FFP와 SSC영역 단면 근처의 도파로 구조와 비상관성, 온도특성열화 등은 BJB 및 SSC영역내의 불균일한 도파로 구조에 의해 발생하는 방사모드와 두 영역 사이의 좋지 못한 광결합 효율에 의해 발생하는 SHB현상에 기인함을 처음으로 지적하였다.

OCIS codes : 140.0140, 230.0230.

I. 서 론

앞으로 본격화될 초고속 유선 정보통신망의 인프라 구축을 위해서는 저가격 광가입자 시스템의 개발이 필수적이다. 이를 위해서는 저가격 광송수신 모듈의 개발이 매우 중요하다. 그러나 현재 사용되고 있는 가입자계 광송신모듈에서는 반도체 레이저와 단일모드 광섬유 광축 정렬시에는 능동정렬방식이 사용되고 있으며, 이 경우 submicron 이하의 매우 엄밀한 정렬오차가 요구되기 때문에 많은 시간과 비용이 초래되어 대량 생산 및 저가격화에 많은 문제점이 있다.^[1,2] 이러한 정렬오차 허용도는 반도체 레이저와 단일모드 광섬유와의 모드크기가 각각 약 2 μm 및 8~10 μm 정도로 크게 차이가 나기 때문이다. 최근 들어 반도체 레이저와 단일모드 광섬유와의 광결합 효율을 증대 시키어 수동광정렬이 가능토록 하는 연구가 활발하다. 이 가운데 모드변환기(SSC: Spot-size converter)가 집적된 반도체 레이저(LD: Laser Diode)를 사용하는 것은 단일모드 광섬유와의 광결합의 향상 뿐만 아니라 동작시간의 향상 및 최대 광출력의 증가 등의 장점이 있어 매우 각광을 받고 있다.^[1,9]

SSC-LD는 SSC 영역의 구조에 따라 lateral-, vertical-, combined-, special-taper로 분류할 수 있으며, 활성영역과 집적화 하는 방법에 따라 BJB(Butt-joint-built-in)방법과 선택MOVPE에 의한 방법이 있다.^[6] 이 가운데 성장층의 두께가 빛의 진행 방향에 따라 변화하는 vertical-taper SSC 구조는 결정성장에 의해 성장층 두께를 제어할 수 있어 재현성이 우수하며, BJB집적화 방식은 활성영역과 SSC 영역의 광도파로 구조 및 재료를 독립적으로 제작할 수 있는 장점이 있다.^[7,8] 본 연구에서는 광가입자계 광송신모듈용 광원으로서 BJB 방식으로 집적된 1.3

μm SSC FP(Fabry-Perot)-LD를 제작하고 발전특성을 평가하였다. 특히 활성영역과 SSC영역간의 광결합효율 및 BJB접합면과 SSC영역에서의 방사모드가 광출력특성에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 이를 통해 SSC-LD의 성능향상을 위한 지침을 얻고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 본 연구에서 제작한 1.3 μm SSC FP-LD의 구조 및 제작 방법, III절에서는 해석방법, IV절에서는 결과 및 검토를 정리하였다.

II. 1.3 μm SSC FP-LD의 제작 및 발전특성

그림 1은 저압 MOVPE(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)으로 제작한 1.3 μm SL(Strained-layer)-MQW(Multiple-Quantum-Well) SSC FP-LD의 개념도이다. 활성층은 양자우물 두께 60Å, 전위장벽 두께 100 Å, 양자우물수 8, InGaAsP SCH층 밴드갭 파장, $\lambda_g = 1.07 \mu\text{m}$, n층 및 p층 SCH층 두께 각각 1000 Å의 MQW-SCH구조로 되어 있다. 양자우물과 전위장벽의 조성은 각각 +0.6% compressive-strained $\text{In}_{0.655}\text{Ga}_{0.345}\text{As}_{0.37}\text{P}_{0.63}$ 과 -0.36% tensile-strained $\text{In}_{0.835}\text{Ga}_{0.165}\text{As}_{0.16}\text{P}_{0.84}$ 로 되어 있으며, 활성영역만으로 제작된 공진기 길이 1000 μm 의 cleaved-facet의 stripe LD에서 발전개시전류밀도 600 A/cm²로 낮은 값이 얻어졌다. BJB 접합면에서의 InGaAsP 도파로 두께는 SSC 영역 끝 부분의 광도파로 두께 t_{SSC} 에 비해 약 4배 정도 두껍게 성장되었다. $\mu\text{-PL}$ (Photoluminescence)로 측정된 SSC 영역의 InGaAsP 도파로 성장층의 PL 피크파장은 BJB접합면에서 SSC 끝단으로 진행하면서 1.12 μm 에서부터 1.07 μm 까지 변화하였다. Si₃N₄ mask, RIE 및

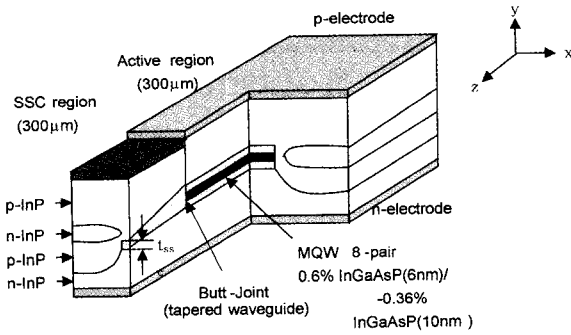


그림 1. 제작한 1.3 μm SL-MQW SSC FP-LD의 구조 개념도.

wet etching을 사용하여, BH(Buried-Heterostructure) 폭 1.0~1.2 μm의 도파로를 형성하였다. 제작된 소자는 활성영역과 SSC 영역의 길이가 각각 300 μm이며 단면은 as-cleaved 상태이다.

SSC-LD의 발진특성은 SSC영역의 끝단의 두께 t_{ssc} 를 400 Å에서부터 1000 Å까지 변화시키면서 조사하였다. 발진개시 전류 11~13 [mA], 특성온도 $T_0 = 48\sim 58$ K, 활성영역의 단면으로부터의 광출력 미분효율 값 η_{dr} 는 0.08~0.1 mW/mA 정도로 특별히 t_{ssc} 의 의존성을 발견하기 힘들었다. 그러나 SSC 단면으로부터의 광출력 미분효율 값 η_{dr} 과 양단면에서의 광출력비 $P_{out,r}/P_{out,l}$ 은 t_{ssc} 에 많이 의존함을 알 수 있었다. 그림 2에 SSC 영역의 도파로 두께 t_{ssc} 에 따른 η_{dr} 과 $P_{out,r}/P_{out,l}$ 변화를 각각 나타내었다. 여기서 $P_{out,l}$ 과 $P_{out,r}$ 은 각각 활성영역 및 SSC영역의 단면으로부터의 광출력 세기를 의미한다. t_{ssc} 가 400~1000 Å 영역에서 η_{dr} 은 0.23~0.32 mW/mA, $P_{out,r}/P_{out,l}$ 은 2.5~3.8까지 변화하였다. FFP(Far-Field Pattern)은 SSC 끝단면에서 10 cm 떨어진 영역에서 지름 2 mm의 InGaAs PIN detector로 측정하였다. FFP의 FWHM(Full Width at a Half Maximum)값은 9.5°~12.3° 정도였으며, $t_{ssc} = 700\sim 1000$ Å 영역에서 거의 원형에 가까운 FFP이 얻어졌다. 그림 3에 SSC 단면 출사광의 FFP FWHM의 변화를 나타내었다. SSC 단면 출사광이 SSC 끝단의 광도파로의 도파모드로 출사하는

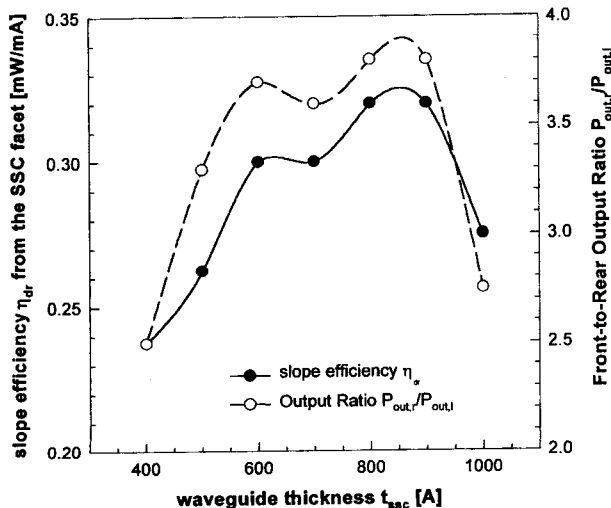


그림 2. 두께 t_{ssc} 에 따른 SSC영역 단면에서의 미분효율 및 광출력비.

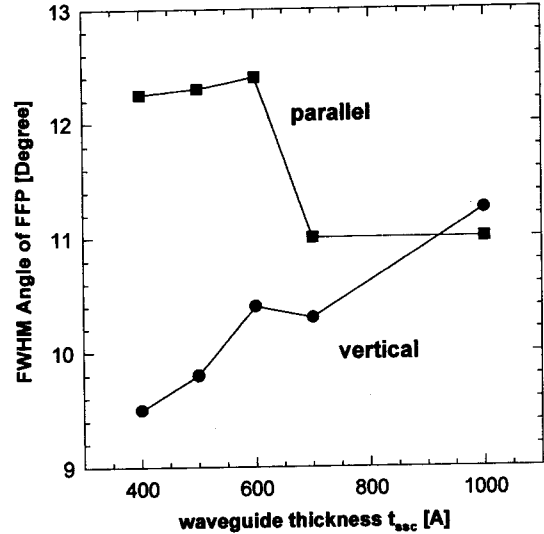


그림 3. SSC영역의 도파로 두께 t_{ssc} 에 따른 접합면에 평행 및 수직인 방향으로의 FFP의 FWHM 값의 변화.

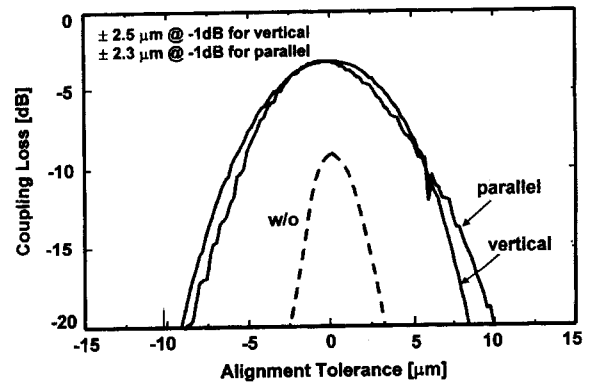


그림 4. SSC-LD와 직선도파로를 갖는 일반적인 LD의 정렬오차 허용도 실험결과.

경우는 t_{ssc} 의 두께가 얇아질수록 성장면의 수직 및 수평방향에 대해서 모두 줄어들어야 함이 원칙이다. 그러나 실험결과의 수평방향 FWHM값은 줄어들지 않았는데, 이는 광출력 성분 중에는 SSC 끝단 광도파로의 도파모드 이외의 성분이 포함되어 있을 것으로 생각된다. $t_{ssc} = 1000$ Å의 SSC-LD 칩에 대해서 단일모드 광섬유와의 결합거리 20 μm로 고정하고, 결정성장면의 수평 및 수직방향으로 정렬오차 허용도를 조사하였다. 그림 4에 이에 대한 결과를 나타내었다. 최대결합효율 50% 이상의 높은 광결합효율과 추가광결합손실을 -1[dB]로 제한한 경우 수평방향 ±2.5 μm 및 수직방향 ±2.3 μm의 매우 큰 정렬오차 허용도를 동시에 얻을 수 있어 본 연구에서 제작한 SSC-LD를 수동광정렬 방식에 충분히 사용 가능함을 알 수 있었다.

III. SSC-LD 모델링 및 발진특성 해석방법

3.1. 해석모델

제작한 SSC-LD에서는 양단면에서의 광출력비 $P_{out,r}/P_{out,l}$ 는

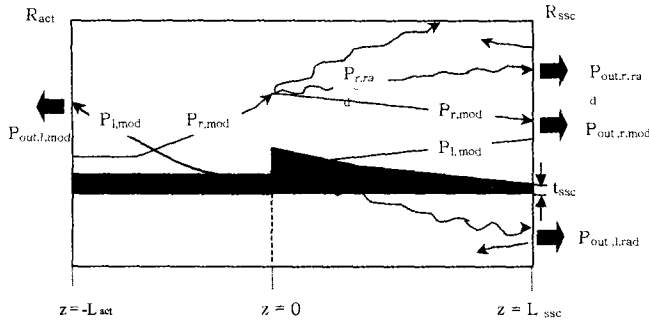


그림 5. SSC-LD의 비대칭 현상을 설명하기 위한 해석 모델.

2.4~3.8 정도로 매우 크게 나타났으며, SSC영역 단면으로부터의 FFP의 FWHM값은 t_{SSC} 가 줄어들어도 더 이상 작아지지 않는 현상이 관측되었다. 또한 일반적으로 SSC-LD는 활성층만으로 구성된 FP-LD에 비해 온도특성이 다소 떨어진다. 이러한 비정상적인 특성들은 활성영역과 SSC영역간의 광결합이 거의 완벽할 것으로 여겨지는 선택MOVPE방법으로 제작되는 SSC-LD에서도 종종 실험적으로 관측되고 있지만, 아직 이에 대한 원인 분석이 거의 이루어져 있지 않고 있다. 본 연구에서는 이에 원인분석을 행하고 이를 통해 SSC-LD의 성능향상을 위한 지침을 얻고자 한다.

그림 5에 해석 모델을 나타내었다. 아랫첨자 *mod* 및 *rad*는 각각 도파모드와 방사모드 성분을 나타내며, 아랫첨자 *l*과 *r*은 각각 활성영역 단면과 SSC 단면으로의 진행 방향을 나타낸다. 활성영역의 이득과 도파로 구조를 생각해서 Quasi-TE편파를 가정하였다. 전계 E 는 x방향 성분(E_x)이 지배적이기 때문에 본 해석에서는 다른 전계 성분은 무시하였다. 진행방향으로의 임의의 점 z 에서의 E_x 성분은 다음과 같이 쓸 수 있다.^[10]

$$E_x(x, y, z, \omega) = \sum_{q=1}^{N_{max}} D_q G_q(x, y) e^{-j\beta_q z} + \sum_0^{k_0 n_c} D(\beta) G_r(x, y, \beta) e^{-j\beta z} d\beta + \sum_{-j\omega}^0 D(\beta) G_a(x, y, \beta) e^{-j\beta z} d\beta \quad (1)$$

여기서 β 는 전파정수, ω 는 각주파수, k_0 는 진공중의 전파정수, n_c 는 clad의 굴절율, N_{max} 는 도파모드의 총수이다. 식 (1)의 첫번째 항은 z 점의 도파로가 무한한 경우의 도파모드, 두 번째 항은 방사모드, 세 번째 항은 감쇄모드를 나타낸다. 감쇄모드는 출력에 크게 영향을 미치지 못하므로 본 연구에서는 생략하기로 한다. D_q 와 $D(\beta)$ 는 각각의 전개계수로 각각의 모드들의 직교성을 이용하여 결정하는 것이 가능하다. L 는 축퇴된 방사모드의 합을 나타낸다.

제작한 SSC-LD는 활성영역($-L_{act} \leq z \leq 0$)에서의 기본도파모드만 존재하기 때문에 식 (1)에서 첫번째 항만 존재할 것이며, $N_{max} = 1$ 이다. SSC영역($0 \leq z \leq L_{SSC}$)에서는 도파로의 구조가 연속적으로 변화하기 때문에 식 (1)의 제1항과 제2항이 동시에 존재하게 된다. SSC영역의 광도파로 구조가 z 축에 따라 매우 서서히 변화하는 경우는 제1항이 제2항 보다 충분히 크게 되

며, SSC영역의 광분포는 도파모드와 거의 유사하게 되어 레이저 빔의 크기가 z 축에 따라 확대되게 된다. SSC영역은 발진파장에 대해 광흡수가 적은 물질을 쓰기 때문에 SSC영역에서의 광흡수가 무시가능하고, SSC-LD의 단면의 반사율이 거의 같은 경우는 양단면의 광출력은 거의 같은 비율로 얻어지게 된다. 또한 SSC단면에서의 NFP(Near Field Pattern)은 SSC영역의 끝단($z = L_{SSC}$)에서의 광분포가 도파모드 성분으로 구성되어 있는 경우는 SSC-LD의 FFP은 $z = L_{SSC}$ 에서의 도파모드와 매우 큰 상관관계를 가지게 된다. 따라서 SSC 영역의 도파로 폭 W 가 일정할 경우, $z = L_{SSC}$ 에서의 도파로 두께 t_{SSC} 가 얇아질수록 2차원 광분포가 퍼지게 되기 때문에 되며 SSC영역의 이의 FFP 역시 좁아지게 될 것으로 예측된다.

그러나 SSC영역의 광도파로 구조가 z 축에 따라 매우 급격히 변화하거나 산란원이 많이 존재하는 경우는 식 (1)의 제2항이 제1항에 비해 무시 불가능하게 된다. 이 경우 제2항은 SSC영역의 단면($z = L_{SSC}$)에서 출사되는 광출력에는 기여하지만 활성영역의 단면($z = -L_{act}$)에서 출사되는 광출력에는 거의 기여하지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서와 같이 양단면의 반사율이 거의 같은 경우라 할지라도 양단면에서 출사된 광출력은 비대칭이 되게 된다. 또한 방사모드의 광분포는 산란원에 크게 의존하기 때문에 $z = L_{SSC}$ 에서의 NFP와 SSC단면으로부터 출사된 FFP은 $z = L_{SSC}$ 에서의 도파로 두께 t_{SSC} 에 크게 상관관계가 없을 수도 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 SSC-LD는 BJB접합영역($z = 0$) 및 SSC영역에서 많은 산란원이 있을 것으로 예측된다.

이상의 고찰을 바탕으로 SSC-LD의 비대칭 광출력 특성을 분석하기 위하여 그림 5와 같은 매우 단순화된 모델을 가정하였다. 또한 모델에서 해석한 결과와 실험결과를 비교 분석함으로써 제작한 SSC-LD의 활성영역과 수동영역 사이의 도파모드의 광파워 결합계수 C_{out} 과 방사모드가 광출력에 미치는 영향을 알아 보았다. 해석모델에서는 활성영역구조는 실제의 SSC-LD활성영역 구조와 같고 SSC영역 구조는 제작한 SSC-LD의 $z = L_{SSC}$ 의 도파로로 구성되어 있다고 가정하였다. 또한 SSC-LD에서 발생하는 산란광은 모두 BJB접합면($z = 0$)에서 발생되며 방사모드에 의한 광출력 증가는 SSC영역 단면으로부터 출사되는 광에만 영향을 미친다고 가정하였다.

상기의 모델을 다음과 같은 고찰에 근거한다. 본 해석모델에 의하면 $z = -L_{act}$ 에서 공기중으로 출사되는 광출력 $P_{out,l}$ 은 활성영역의 도파모드의 광출력만에 의해 결정된다. 이 가정은 활성영역의 광도파로가 BJB접합부분의 SSC영역의 도파로 두께 보다 얇은 경우에 적절하며, 실제 제작한 SSC-LD의 경우에 해당된다. 이는 얇은 도파로에서 두꺼운 도파로로 진행하는 파의 접합면에서의 반사율이 반대 방향으로 진행하는 파의 반사율 보다 작기 때문이다. 반면 $z = L_{SSC}$ 에서 출사되는 빛 $P_{out,r}$ 은 도파모드와 방사모드로 구성된다. 여기서 도파모드라 함은 $z = L_{SSC}$ 의 도파로 구조에 해당되는 도파모드를 칭한다. 실제 성장된 SSC영역의 구조는 BJB접합지점에서부터 50~100 μm 정도 만이 두께나 조성이 변화하고 나머지 200~250 μm 영역은 거의 평탄하다. 200~250 μm 정도의 평탄한 영역은 SSC영역에서 +z방향을 진행하는 진행파가 도파모드로 변형되기에

충분한 거리이고, 따라서 $P_{out,r}$ 성분 가운데 SSC영역의 도파 모드 성분은 $z=L_{SSC}$ 에서의 도파모드와 같게 될 것이다. $P_{out,r}$ 성분이 도파모드 성분만으로 구성되어 있고 양단면이 as-cleaved되어 있는 경우에도 단면의 반사율 차 혹은 수동도파로의 광손실 등에 의해 양단면으로부터 출사되는 광출력에 차이가 있을 수 있는데 이들 현상 만으로는 본 연구에서 얻어진 큰 비대칭 광출력 현상을 설명하기는 어렵다. SSC영역에서 발생하는 방사모드는 BJB접합($z=0$) 혹은 SSC영역내의 불균일한 도파로 영역에서 발생된다. SSC영역에서의 도파로 profile은 성장조건에 따라 변화하며 도파로폭이 약 $1\mu m$ 정도로 좁기 때문에 실제 제작한 도파로 profile의 검증 및 정량적인 해석은 지극히 힘들다. 여기서는 다음과 같은 정성적인 고찰을 행하였다. 앞서의 가정을 통해 활성층영역에서 +z방향으로 진행되는 진행파는 $z=0$ 에서 대부분 SSC영역으로 도파되기 때문에, +z방향으로 진행되는 발진광의 산란은 대부분 도파로 두께가 좁아지는 $0 \leq z \leq 100\mu m$ 영역에서 산란된다. 또한 -z 방향으로 진행되는 파의 경우는 주로 $z=0$ 의 BJB접합면에서 많이 반사가 발생할 것이다. 따라서 본 해석 모델에서의 방사 모드 광성분 SSC단면으로부터 출사되는 출력광에만 영향을 미치게 된다.

3.2. 해석방법

상기의 현상을 다음과 같이 수식화하였다. SSC-LD에서는 공진축방향으로 BJB접합부분이 있고, 후술하는 바와 같이 이 부분에서의 광파워 결합계수량 C_{out} 에 따라 활성층영역($-L_{act} \leq z \leq 0$)에 커다란 불균일 광분포와 캐리어 분포가 나타날 수 있다. InGaAaP계 활성층 물질에서는 이득포화 현상이 심하기 때문에 SHB(Spatial Hole Burning) 효과는 레이저의 출력특성을 변화시킬 수 있기 때문에 본 해석에서는 SHB현상을 고려하였다. SSC-LD의 도파모드의 발진특성해석은 공진축방향, 즉 z축 방향으로 레이저 공진기를 50개 부분으로 나누어 각각의 영역에 대하여 광분포, 캐리어 분포, 이득, 손실을 계산하였다.^[11]

우선 발진모드의 광분포는 활성층이 compressively strained-QW이고 비대칭 광도파로라는 사실에 근거하여 기본 Quasi-TE mode로 생각하였으며, 해석을 간단히 하기 위해서 가장 전계성분이 강한 빛만을 고려의 대상으로 하였다. +z 방향으로 진행되는 진행파는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{E}(x, y, z) \approx G(x, y)e^{\{g(x, y, z)/2 - j\beta(x, y, z)\}z} \hat{x} \approx F(x)K(y)e^{\{g(x, y, z)/2 - j\beta(x, y, z)\}z} \hat{x} \quad (2)$$

여기서 $F(x)$ 와 $K(y)$ 는 WIM(Weighted-Index Method)에 기초한 2차원 수동도파로 해석에 의해서 얻어진다. $g(x, y, z)$ 는 전력 순이득계수이고 $\beta(x, y, z)$ 는 전파정수이다. 본 해석에서는 SSC-LD의 비대칭 광출력에만 관심이 있기 때문에 발진광은 위상조건을 만족하는 단일종모드를 대상으로 하여 이의 진폭 조건만을 풀이하였다. $g(x, y, z)$ 는 활성층의 두께가 매우 얇은 점을 고려하여 성장층에 대해 평행한 x축방향으로의 확산효과만을 고려한 2차원 $g(x, z)$ 로 근사하였으며, 캐리어율 방정식을 통해 광분포 및 캐리어 분포와 연결되어 있다. 해석 시 사용

한 캐리어율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{J(x, z)}{qd} = -D \frac{\partial^2 N(x, z)}{\partial x^2} + \frac{N(x, z)}{\tau_{nr}} + BN^2(x, z) + v_g g_N |F(x)|^2 \quad (3)$$

여기서, D 는 활성층의 확산 계수, d 는 활성층의 두께, τ_{nr} 과 B 는 각각 캐리어 비발광 재결합시간과 자발 천이 계수, v_g 는 군속도이다. 좌변은 활성층에 주입되는 캐리어 수를 나타낸다. 우변의 첫째 항은 캐리어 밀도 차이에 의한 캐리어 확산 과정, 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 nonradiative 재결합과 자발 천이에 의한 캐리어 손실을 나타낸다. 마지막 항은 활성층내의 광에 의한 유도 방출을 통한 캐리어의 감소를 나타낸다. $g_N(N, x)$ 는 활성층내의 이득분포를 나타내며 식 (7)에 나타나 있다.

SSC-LD의 발진시 광분포 및 캐리어 분포는 다음의 이득 발진조건을 만족하는 값에서 결정된다. 사용한 발진이득조건은 다음과 같다.

$$\sqrt{R_{act} R_{SSC}} C_{out} \prod_{i=1}^{2m} e^{(\bar{g}_i - \bar{\alpha}_i) \Delta z_i / 2} = 1 \quad (4)$$

여기서 R_{act} 과 R_{SSC} 는 각각 활성층영역과 SSC영역에서의 단면의 전력 반사율, C_{out} 는 BJB접합면에서의 쌍방향 전파에 대한 평균전력광결합계수이다. Δz_i 는 i 번째의 미소 영역의 길이를 나타내며, \bar{g}_i 와 $\bar{\alpha}_i$ 는 각각 Δz_i 영역내에서의 평균전력이득 및 평균전력손실인데, i 영역에서 x- 및 y-방향으로 평균한 값이고 식 (5)와 (6)처럼 쓸 수 있다.

$$\bar{g}_i = \frac{\int E_i g_N E_i^* dx dy}{\int E_i E_i^* dx dy} \quad (5)$$

$$\bar{\alpha}_i = \Gamma_y \alpha_{act} + (1 - \Gamma_y) \alpha_{clad} + \Gamma_y \frac{\int F_i \kappa N(x) F_i^* dx}{\int F_i F_i^* dx} \quad (6)$$

κ 는 자유 캐리어 흡수에 의한 손실을 나타내는 계수이다. 여기서 이득 함수 g_N 은 이득 포화가 고려된 아래식으로 쓸 수 있다.

$$g_N = \frac{a(N - N_g)}{1 + \epsilon F_i F_i^*} \quad (7)$$

식 (5), (6), (7)를 self-consistent하게 풀이함으로써 특정 전류 인가시 SSC-LD의 양단면에서 출사되는 도파모드에 대한 광출력을 알 수 있다.

상기의 SSC-LD도파모드 해석과 더불어 본 해석모델에서는 SSC영역 단면에서는 광출력 성분에는 방사모드에 의한 성분이 추가로 더하여 진다고 가정하였다. 앞서의 고찰을 바탕으로 SSC-LD의 양단면을 통해 발생하는 출사되는 광출력에 대해 다음과 같은 경계조건을 사용하였다.

$$P_{r, mod}(z=0_+) = C_{out} P_{r, mod}(z=0_-) \quad (8)$$

$$P_{out, l, mod}(z=0_-) = C_{out} P_{l, mod}(z=0_+) \quad (9)$$

$$P_{out,r,mod}(z=L_{SSC+})=(1-R_{SSC})P_{r,mod}(z=L_{SSC-}) \quad (10)$$

$$P_{r,rad}(z=0_+)= (1-C_{out})P_{r,mod}(z=0_-)+ (1-C_{out})P_{l,mod}(z=0_+) \quad (11)$$

$$P_{out,r,rod}(z=L_{SSC+})=P_{r,rod}(z=0_+)T_{eff} \quad (12)$$

$$P_{out,l}=P_{out,l,mod}(z=-L_{act-}) \quad (13)$$

$$P_{out,r}=P_{out,r,mod}(z=L_{SSC+})+P_{out,r,rad}(z=L_{SSC+}) \quad (14)$$

식 (8)~식 (14)에서 아랫첨자 “-”와 “+”는 각각 주어진 z 위치의 직전과 직후를 의미한다. 식 (8)~식 (9)는 BJB접합면에서의 도파모드의 광결합이 서로 같다는 가정이며, 식 (10)은 SSC단면으로 부터의 도파모드의 광출력을 나타낸다. 식 (11)의 첫번째 및 두번째 항은 각각 +z와 -z방향으로 진행되는 도파모드에 의해 발생하는 방사모드 성분을 나타낸다. 방사모드는 일반적으로 파면이 다양하기 때문에 SSC단면에 도달하기에 앞서 기판이나 cap층을 통해 손실되는 성분이 존재할 것이다. 또한 각각의 방사모드들의 SSC단면의 반사율도 같지 않을 것으로 생각된다. 이러한 효과를 총체적으로 취급하기 위해서 SSC단면에서의 방사모드의 유효투과율 T_{eff} 을 식 (12)처럼 정의하였다. 식 (13)과 식 (14)는 각각 활성영역 및 SSC 영역의 단면으로부터 출사되는 총광출력을 나타낸 식들로서, 활성영역 단면으로부터는 도파모드만이 존재하고 SSC영역 단면으로부터는 도파모드와 방사모드가 동시에 존재함을 알 수 있다. 결국 SSC영역의 광출력이 활성영역의 광출력비를 결정하는 가장 큰 이유는 식 (14)의 두번째항의 대소에 관계됨을 알 수 있다.

IV. 해석 결과 및 검토

그림 6에 C_{out} 에 따른 공진기 내부의 도파모드의 광강도 분포를 나타내었다. 표 1에 해석에 사용한 parameter값들을 요약해 놓았다. C_{out} 이 변화하는 경우에도 SSC-LD의 양단면에서 출사되는 광강도에는 차이가 없음을 알 수 있다. SSC영역에서 광강도 세기가 +z방향으로 다소 줄어드는 것은 SSC의 광손실 α 를 12 cm^{-1} 로 가정하였기 때문이다. 이와 같이 도파모드만에 의해 비대칭 광출력이 얻어지는 경우는 SSC영역의 도파로 손실이 매우 큰 경우는 발생한다. 그러나 본 연구에서와 같이 BJB접합을 이용해 SSC영역을 성장시키는 경우에는 SSC영역 도파로 재질을 발진 파장에서 거의 흡수가 없는 물질을 사용하기 때문에, C_{out} 양 및 SSC영역의 도파로 손실에

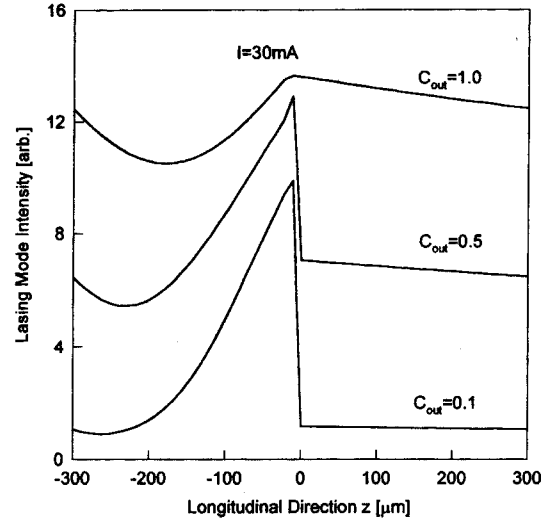


그림 6. 활성영역과 SSC영역 사이의 발진모드의 광결합을 C_{out} 에 따른 longitudinal 방향으로 내부 광강도 분포.

의해 큰 비대칭 출력을 설명하기 힘들다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 C_{out} 양이 작아질수록 BJB접합부분($z=0$)에서의 광강도 세기가 커지며 활성영역($-300\ \mu\text{m} < z < 0$) 내에서 매우 심한 SHB현상이 발생함을 알 수 있다. SHB현상이 심하게 발생하는 소자의 경우는 실효적인 이득의 감소 및 손실의 증가 등을 통해서 광출력 특성이 열화되거나, 출사되는 광파면의 변형이 발생되어 광분포의 FFP이 굴절율형 도파로에서 벗어난 형태를 보일 수 있기 때문에 본 연구에서는 SHB를 고려한 엄밀한 해석을 행하였다. 실제 제작한 SSC-LD의 경우는 활성영역으로부터 출사된 빔의 FFP은 마치 이득형 반도체 레이저와 유사한 형태가 얻어졌는데 이는 활성영역내에서 강한 SHB 현상에 기인한 것으로 예측된다. 이에 반해 SSC영역 단면에서 출사된 빔의 FFP은 굴절율형태의 단일 봉우리의 FFP이 얻어졌는데 이는 활성영역에서 출사된 빔은 SSC영역내를 전파하면서 위상이 다시 평면파 형태로 정렬되었기 때문이라고 생각된다.

제작한 SSC-LD의 C_{out} 값이 어느 정도인지는 활성영역의 단면의 출력의 미분효율을 해석함으로써 예측하여 보았다. 해석 모델에서는 SSC영역에서의 방사모드는 대부분 SSC영역의 단면 혹은 반도체 외부로 방출된다고 가정하였기 때문에 활성영역의 단면에서 출사되는 광출력의 미분효율은 C_{out} 양에 의해 결정된다. 그림 7에 C_{out} 에 따른 활성영역 단면으로부터의

표 1. 해석에 사용한 parameter값들

Name	Symbol	Value	Unit
BH Width	W	1.2	μm
Active Length	L_{act}	300	μm
SSC Length	L_{SSC}	300	μm
Diffusion Constant	D	50	cm^2/sec
Leakage Coefficient	A	6.0×10^8	s^{-1}
Spontaneous Recombination Coefficient	B	6.0×10^{-11}	cm^3/s
Auger Recombination Coefficient	C	4.0×10^{-29}	cm^{-6}/s
Transparent Carrier Density	N_g	1.5×10^{18}	cm^{-3}

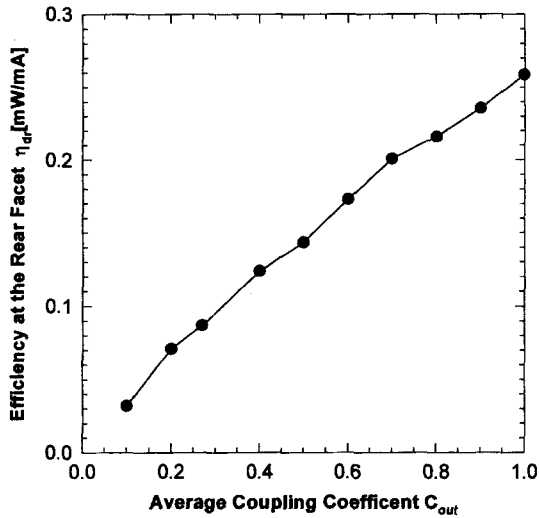


그림 7. C_{out} 에 따른 LD의 활성영역에서의 미분효율 η_{dr} .

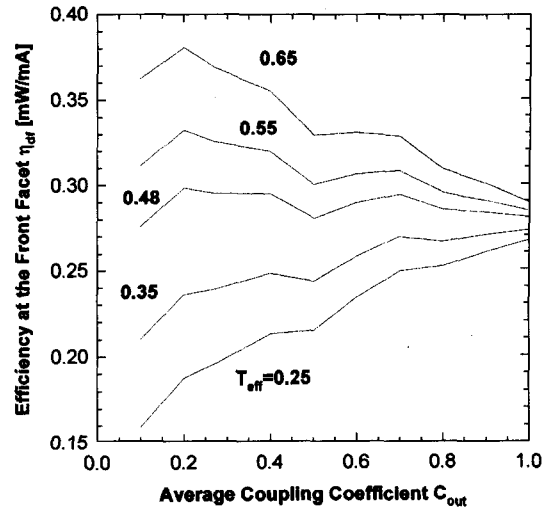


그림 9. C_{out} 에 따른 LD의 SSC 영역으로 부터의 미분효율 η_{dr} .

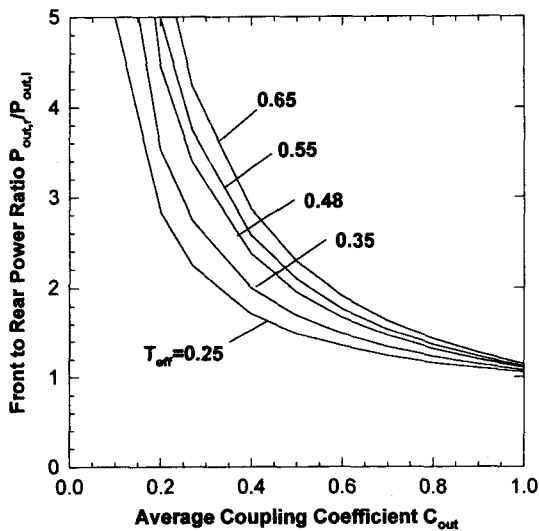


그림 8. C_{out} 에 따른 활성영역 광출력 $P_{out,l}$ 및 SSC 영역으로 부터의 광출력 $P_{out,r}$ 의 비 $P_{out,r}/P_{out,l}$.

미분효율을 나타내었다. 제작한 SSC-LD의 활성영역 단면으로부터 방출되는 광출력의 미분효율은 0.09-0.1 mW/mA로 측정되었는데, 그림 7의 해석결과와 비교해보면 제작된 SSC-LD의 C_{out} 값은 약 25%~30%로 추정된다.

그림 8에 C_{out} 에 따른 SSC영역의 단면으로 부터의 광출력 $P_{out,r}$ 와 활성영역의 단면으로부터의 광출력 $P_{out,l}$ 의 비를 나타내었다. 여기서 파라미터는 T_{eff} 이다. 측정된 SSC-LD의 $P_{out,r}/P_{out,l}$ 은 t_{ssc} 값에 따라 다소 다르나 대부분 3~4정도이다. 그림 7에서 예측한대로 $C_{out}=25\% \sim 30\%$ 에 해당된다면 방사모드의 실효적인 단면반사율 $T_{eff}=50\% \sim 60\%$ 정도로 예측된다. 실제 도파모드의 경우 전력투과율은 70%정도인데 비해서 다소 낮은 이유는 방사모드의 경우는 여러 편파면을 가지고 있어 단면의 반사율이 다르고 또한 실제 단면에 도달하는 양도 다소 적기 때문으로 생각된다. 그림 9에 C_{out} 에 따른 SSC영역의 단면으로부터의 광출력의 미분효율 η_{dr} 을 나타내었다. 제작한 SSC-

LD에서는 앞서의 토론으로부터 $C_{out}=25\% \sim 35\%$, $T_{eff}=50\% \sim 60\%$ 정도임을 예측할 수 있었는데, 이 경우 그림 8로부터 SSC영역으로부터의 광출력의 미분효율은 0.3 mW/mA-0.35 mW/mA 정도가 됨을 알 수 있다. 이는 실험치와 거의 유사한 결과이다. 이상으로부터 $C_{out}=25\% \sim 35\%$, $T_{eff}=50\% \sim 60\%$ 의 예측이 타당함을 알 수 있다.

본 해석 모델을 통한 SSC-LD의 특성 해석으로부터 BJB접합이나 SSC영역에서 산란되어 광출력에 영향을 미치지 못하는 양은 전체 방사모드양의 약 10~20% 정도에 그치고 있다. 이 양은 양단면을 통해 출사되는 전체 출력량에 비해 적은 양이기 때문에, 제작한 SSC-LD에서는 광결합이 100%인 경우의 이상적인 BJB접합을 갖는 SSC-LD에서 보다는 오히려 SSC-LD의 단면으로부터의 높은 광출력을 얻을 수 있다. 그러나 이와 같은 경우는 양단면의 반사율이 거의 같은 때에만 적용된다는 사실에 주의하여야 한다. 방사모드가 출사됨에 많이 포함되어 있는 경우는 등위상면을 SSC영역의 도파로 구조변화에 의해 조절하기 어렵기 때문에 FFP의 반치폭을 어느 이상 줄이는 데에는 한계가 있을 뿐만 아니라 발진개시 전류가 증가와 온도특성이 나빠질 수 있는 단점이 있다. 그림 10에 C_{out} 에 따른 발진개시 전류의 변화를 나타내었다. $C_{out} > 0.7$ 인 경우는 발진개시전류의 증가는 없으며, C_{out} 이 0.7이하에서 서서히 증가해 $C_{out} < 0.2$ 가 되면 급격히 증가함을 알 수 있다. 제작된 SSC-LD의 C_{out} 이 약 0.3 정도이기 때문에 $C_{out}=1.0$ 의 이상적인 경우에 비해 약 30% 정도의 발진개시전류의 증가 했음을 예측할 수 있다. 따라서 낮은 발진개시전류, 높은 미분효율, 좁은 FFP를 동시에 달성하기 위해서는 이상적인 BJB접합, SSC 영역내에 도파모드 간 결합에 의한 모드 변환, 활성영역단면에 고반사막 코팅, SSC 영역단면에 저반사막 코팅을 동시에 달성하는 것이 중요함을 알 수 있다. SSC-LD는 SSC영역과 활성영역이 매우 좁은 영역에서 집적화 되어 있기 때문에 두 영역사이에서 발생하는 현상을 추정하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서 얻어진 그림 7~그림 9의 결과들은 실제 제작한 SSC-LD에서 활성영역과 SSC영역간의 광결합 효율,

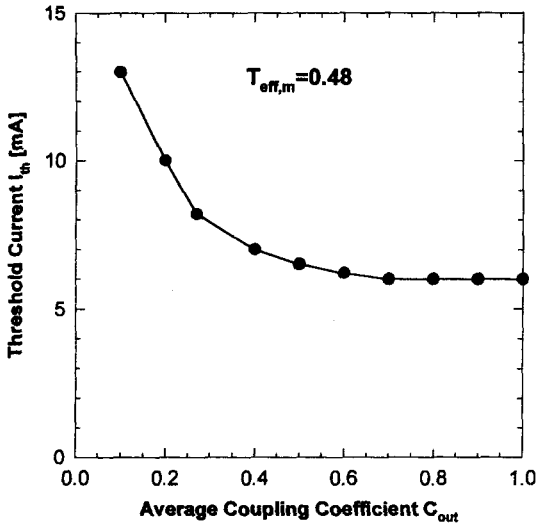


그림 10. C_{out} 에 따른 발진개시전류 변화.

도파모드 및 방사모드 비 등을 예측하는데 매우 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결 론

광가입자용 광원으로서 유망한 모드변환기가 집적된 1.3 μm SSC-FP-LD를 저압 MOVPE결정성장법을 사용해 제작하고 이의특성을 분석하였다. SSC-LD의 활성영역과 SSC영역은 BJB 방법으로 접합하였으며 taper형 도파로 구조를 선택성장법으로 성장하였다. 활성영역 300 μm, SSC영역 300 μm, 양단면 cleaved-facet을 갖는 SSC-LD의 특성을 측정된 결과 SSC단면으로부터의 미분효율 0.23~0.32 mW/mA, FFP의 FWHM값은 9.5°~12.3°, 단일모드 광섬유와의 광결합시 추가광결합손실 -1 dB 범위내의 수평방향 ±2.5 μm 및 수직방향으로 ±2.3 μm 정렬오차 허용도 등과 같은 양호한 특성을 얻었다. 그러나 SSC영역의 도파로 구조와 FFP의 FWHM의 상관관계를 명확히 할 수 없거나, 활성영역만으로 제작된 FP-LD에 비해 발진개시전류 및 특성온도의 특성이 다소 열화되며, 양단면으로 출사되는 광출력에 매우 비대칭적 현상이 얻어지는 등의 문제점이 있었다. 이러한 SSC-LD의 문제점들을 이해하고 SSC-LD의 성능향상에 대한 지침을 얻고자 방사모드를 고려한 SSC-LD 특성 해석을 행하였다. SSC-LD에서 발생된 상기의 문제점들은 BJB접합면과 SSC영역의 불균일한 도파로 구조에 의한 방사모드 성분과 활성영역에서 발생하는 큰 SHB가 매우 중요한 역할을 함을 알 수 있었다. 실제 제작한 SSC-LD에서 활성영역과 SSC영역간의 도파모드 간의 광결합계수 C_{out} 와 방사모드의 SSC단면에서의 유효파울 T_{eff} 를 정량적으로 추출하여 본 결과 $C_{out}=25\% \sim 35\%$, $T_{eff}=50\% \sim 60\%$ 정도임을 예측할 수 있었다. 제작한 SSC-LD의 양단면으로 발생하는 비대칭 광출력 특성은 활성영역 단면에서 출사되는 광출력은 도파모드 성분이 좌우하는데 반해 SSC영역 단면에서 출사되는 빔에는 도파모드 성분 이외에 많은 양의 방사모드성분이 포함되어

있기 때문에 예측되었다. 또한 SSC영역에서의 도파로 두께를 줄임에 따라 FFP의 FWHM을 더 이상 조절할 수 없는 이유는 SSC단면으로 부터의 출사광내에 많은 양의 방사모드 성분이 포함되어 있기 때문으로 해석될 수 있다. SSC-LD에서 도파모드의 광결합계수 C_{out} 값이 작은 경우에는 도파광손실의 증가하고 동시에 활성영역에서 SHB현상이 나타나는데, C_{out} 값이 0.3 이하로 작은 경우에는 특히 심한 SHB현상이 발생함을 알 수 있었다. 제작한 SSC-LD의 온도특성 열화 및 활성영역으로부터 출사되는 쌍봉형의 FFP의 빔 모양은 25%~35% 정도의 적은 C_{out} 에 의한 실효적인 단면반사율의 저감과 활성영역에서의 발생하는 심한 SHB에 의한 이득감소와 손실 증가에 의한 영향으로 예측되었다. 이상의 고찰을 통해 SSC-LD에서 낮은 발진개시전류, 높은 미분효율, 좁은 FFP을 동시에 달성하기 위해서는 이상적인 BJB접합, SSC영역내에 도파모드 간 결합에 의한 모드 변환, 활성영역단면에 고반사막 코팅, SSC 영역단면에 저반사막 코팅을 동시에 달성하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 서울대학교 반도체 공동연구소의 교육부 반도체 분야 학술연구조성비(과제번호 1998-016-E-00037)에 의해 수행된 것임.

참고문헌

- [1] B. Mersali, A. Ramdane, and A. Carencu, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1321 (1997).
- [2] V. Vusirikala, S. S. Saini, R. E. Bartolo, S. Agarwala, R. D. Whaley, F. G. Johnson, D. R. Stone, and M. Dagenais, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1332 (1997).
- [3] H. Kobayashi, T. Yamamoto, M. Ekawa, T. Watanabe, T. Ishikawa, T. Fujii, H. Soda, S. Ogita, and M. Kobayashi, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1384 (1997).
- [4] A. Lestra and J. Y. Emery, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1429 (1997).
- [5] K. Kawano, M. Kohtoku, H. Okamoto, Y. Itaya, and M. Naganuma, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1351 (1997).
- [6] I. Moerman, P. P. Van Daele, and P. M. Demeester, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1308 (1997).
- [7] K. Yokoyama, N. Sekino, T. Hirono, Y. Tohmori, and Y. Kawaguchi, IEEE J. Lightwave Technol. **16**, 8, 1456 (1998).
- [8] M. Wada, H. Hiroshi, K. Kishi, Y. Kadota, M. Okamoto, Y. Kondo, Y. Sakai, H. Ohashi, Suzuki, Y. Thomori, M. Nakao, Y. Itaya, and M. Yamamoto, IEEE J. Lightwave Technol. **15**, 3, 498 (1998).
- [9] Y. Inaba, M. Kito, T. Nishikawa, and Y. Matsui, IEEE J. Quantum Electron. **3**, 6, 1399 (1997).
- [10] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, Academic Press, New York (1974).
- [11] S. Y. Choi, J. I. Shim, D. H. Chang, and B. H. Han, IEEE J. Quantum Electron. **34**, 11, 2217 (1998).

Fabrication and analysis of 1.3 μm spot-size-converter integrated laser diodes

Jongin Shim and Youngsun Eo

*School of Electrical Engineering & Computer Science, Hanyang University,
1271 Sa-dong, Ansan-si, Kyungki-do 425-791, Korea*

Donghoon Jang

Optoelectronic Division, Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon P.O. Box 105, Kyungki-do 440-600, Korea

(Received May 9, 2000, Revised manuscript received June 21, 2000)

We have fabricated and analyzed the lasing characteristics of 1.3 μm Spot-Size-Converter (SSC) integrated Fabry-Perot (FP) laser diodes, which are very promising light sources for optical subscriber networks. SSC-LDs has been developed by BJB (butt-joint-built-in) coupling and selective MOVPE growth. High-performances were achieved such as the slope efficiency from the SSC facet of 0.23~0.32 mW/mA, the full-width at the half maximum of the far-field pattern (FFP) of 9.5°~12.3°, the alignment tolerances of $\pm 2.3 \mu\text{m}$ and $\pm 2.5 \mu\text{m}$ within the extra-coupling loss of 1 dB for the vertical and parallel directions, respectively. These experimental results were compared to theoretical ones in order to clarify the operational problems and give a good design direction of the fabricated SSC-LDs. It was revealed that an asymmetric output power from the facets, an irrelevancy of FFP and the waveguide structure around SSC facet region, and a poor temperature characteristics were originated from the scattering in the BJB and SSC sections and SHB effect in the active section for the first time.

OCIS codes : 140.0140, 230.0230.