

## 광가입자용 1.3 $\mu\text{m}$ SSC-FP-LD의 모드변환기 구조 설계

심종인<sup>†</sup> · 진재현 · 어영선

한양대학교 전자컴퓨터 공학부

☎ 425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지

(2000년 7월 18일 받음, 2000년 10월 12일 수정본 받음)

SSC(Spot-size converter)가 집적된 1.3  $\mu\text{m}$  FP(Fabry-Perot)-LD(Laser Diode)에서 SSC 영역의 광도파로 구조가 단일모드 광섬유와의 광결합 효율 및 정렬오차에 미치는 영향에 대해서 3차원 BPM(Beam Propagation Method)를 사용하여 알아보았다. 수직 taper의 경우 광결합효율을 향상하기 위해서는 taper 끝단에 충분한 길이의 직선도파로를 형성하는 것이 중요함을 알 수 있었다. 또한 수평 taper 구조에서는 출사단 방향으로 도파로폭이 좁아지는 경우가 넓어지는 경우에 비해 유리하고, 수직 taper에 비해 완전한 도파로 경사가 필요함을 알 수 있었다. 단일모드 광섬유와의 광결합 손실 및 정렬오차 허용도의 관점에서 좋은 특성을 주는 SSC 도파로 모양을 제시하였다.

OCIS codes : 130.1750, 140.2020.

### I. 서 론

최근들어 인터넷의 보급에 따라 FTTH(fiber to the home) 및 FTTL(fiber to the loop)와 같은 광가입자계에 관심이 집중되고 있다. 이러한 광통신망의 확대 보급을 위해서는 저가의 광송수신 모듈의 개발이 필수적이다.<sup>[1]</sup> 광가입자망에 사용될 광원으로서 발진파장이 1.3  $\mu\text{m}$ 이고, 제작공정이 간단한 FP(Fabry-Perot)-LD(laser diode)가 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 발진개시 전류와 온도특성에 대하여 최적화된 1.3  $\mu\text{m}$  FP-LD에서는 발진광의 출사각이 광섬유의 임계각에 비해 넓고 비대칭적이기 때문에 광섬유와의 광결합효율이 떨어지고 정렬오차허용도가 1  $\mu\text{m}$  이하로 매우 작다.<sup>[2]</sup> 이로 인해 사용 부품 및 제작시간이 증가하고 수율의 낮아져 제작단가가 높아지는 문제점이 있다.

LD와 단일모드 광섬유간의 광결합 효율의 향상을 위해서 micro-lense의 삽입, tapered/lensed fiber를 사용하는 능동정렬 방법이 아직 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 micro-lense들을 사용하여 광결합 효율을 높이는 방법은 lens들을 각각 별도로 실장하여야 하기 때문에 제작비용이 비싸게 되는 단점이 있다. 또한 tapered/lensed fiber를 사용하는 방법은 고가의 장비없이 간단히 제작할 수 있고 매우 광결합 효율을 보인다는 장점이 있으나, 광결합 효율이 횡축 및 종축방향의 정렬오차에 대해 매우 민감히 반응하여 실장함에 있어서 시간과 비용이 많이 소요된다는 어려움이 있다.<sup>[3]</sup>

Si-bench를 이용하여 LD와 광섬유를 butt-joint 방식으로 직접결합하는 방법으로 대표되는 수동정렬방식은 능동정렬방식에 비해 실장 비용과 시간을 대폭 낮출 수 있고 대량생산이 가능하다는 장점이 있으나, 광결합 효율이나 수율이 떨어지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 LD의 출사빔의 모드분포

가 광섬유와의 모드분포가 서로 일치하도록 LD에 모드변환기(SSC: spot-size converter)를 집적한 SSC-LD가 활발히 연구되고 있다. SSC-LD를 이용한 수동정렬방식에서는 광부품수를 줄이고, LD와 광섬유간의 정렬오차허용도를 향상시킬 수 있어 대량생산이 가능하다는 장점이 있다.<sup>[4-6]</sup> 현재까지 1.3  $\mu\text{m}$  SSC-FP-LD를 제작하여 광결합효율의 향상되었다는 보고가 주종을 이루고 있으나, SSC 구조가 단일모드 광섬유와의 광결합효율에 미치는 영향에 대해서 조사한 체계적인 내용은 미흡하다.

본 논문에서는 1.3  $\mu\text{m}$  SSC-FP-LD에서 SSC구조가 단일모드 광섬유와의 광결합 효율에 미치는 영향을 체계적으로 조사하여, SSC 구조제작시 필요한 설계지침을 마련하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 해석구조 및 해석 방법, III절에서는 SSC구조별로 해석결과 및 검토사항, IV절에서는 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하였다.

### II. 해석 모델 및 방법

본 연구에서는 선택 MOVPE(metal-organic chemical vapor deposition) 결정성장법과 화학에칭에 의해 제작 가능한 SSC-FP-LD를 대상으로 하였으며, 이의 구조 개념도를 그림 1에 나타내었다. 선택 MOVPE는 한번의 결정성장으로 활성영역과 SSC영역을 동시에 성장시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 광도파로는 양자우물/전위장벽의 7쌍으로 구성된 MQW(multiple-Quantum-Well) 활성층, MQW양층에 각각 조성파장 1.1  $\mu\text{m}$ 의 InGaAsP SCH층, InP clad층으로 구성되어 있다. 활성영역과 SSC영역의 경계점( $z=0$ )에서의 양자우물, 전위장벽, SCH층의 두께는 각각 80Å, 110Å, 1100Å이라 하였다.  $z=0$ 에서의 양자우물, 전위장벽, SCH층, InP층들의 굴절율은 각각 3.493, 3.396, 3.396, 3.21로 하였으며, SSC영역에서의 양자우물의 굴절율은 성장층의 두께변화에 따른 밴드갭 변화에 맞추어 조정

<sup>†</sup>E-mail: jishim@giga.hanyang.ac.kr

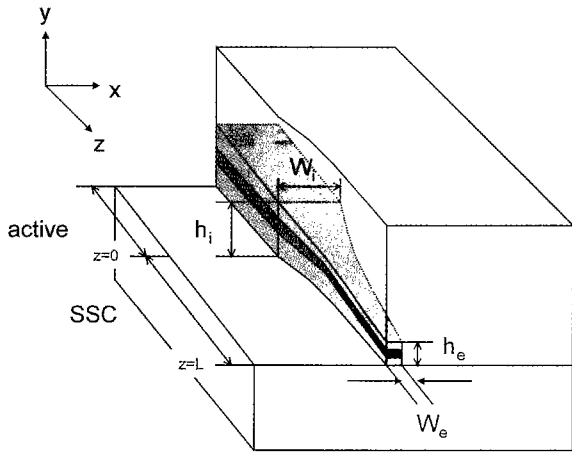


그림 1. 해석에 사용한 1.3 μm SSC-FP-LD의 구조 개념도.

하여 주었다.

SSC-LD의 동작의 기본개념은 활성영역 도파모드의 광분포를 모드변환기 영역을 전파하면서 모드크기를 확대하여, 출사광의 FFP의 모양과 방사각이 대칭적이며 좁아지도록 하여 광섬유와 같은 결합도파로의 도파모드와 유사하게 하여 광결합 효율을 증대시키는 것이다. 1.3 μm SSC-FP-LD의 출사빔과 단일모드 광섬유간의 광결합효율의 해석은 다음과 같은 과정을 통하여 행하여 졌다. 우선 직선도파로로 구성되어 있는 활성영역에서 광분포는 활성영역에서의 도파모드라 가정하였다. 활성영역에서의 도파모드의 전개분포  $E_{so}(x,y)$ 는 WIM(weighted-index method)을 사용하여 해석하였다. SSC영역의 임의의 z축 상에서의 2차원 광분포 광전파  $E_{sz}(x,y)$ 는 3D Split-Step FD (finite difference)-BPM(Beam propagation method)을 사용하여 구하였다. 반사의 효과를 줄이기 위해 광도파로 영역을 중심으로 20 μm×20 μm의 충분히 넓은 해석창 영역과 투명 경계조건을 사용하였다. 계산 시간을 줄이기 위해 도파로 영역과 clad 영역에 불균일 격자 유한차분법을 적용하였으며, 진행방향으로는 해석간격 Δz=0.02 μm로 하였다. 단일모드 광섬유의 고유모드의 전개분포  $E_f$ 는 모드크기가 4 μm인 Gaussian beam이라 가정하였는데, 일반적으로 정규화된 주파수 V가 1.9<V<2.405인 광섬유에 대해서는 도파모드의 Gaussian Beam 근사는 98%의 이상의 정확도를 갖는다.<sup>[7]</sup>

SSC영역에서의 임의의 z점에서의 전개분포  $E_{sz}(x,y)$ 와 단일모드 광섬유의 고유모드  $E_f$  사이의 모드불일치 정도를  $E_{so}$ 와  $E_f$ 로 정규화된 식 (1)과 같이 정의된 MML(Mode Mismatch Loss)로 평가하였다.<sup>[8]</sup>

Mode Mismatch Loss

$$= -10 \log \left\{ \frac{\left| \iint E_{sz} E_f^* dx dy \right|^2}{\iint |E_{so}|^2 dx dy \iint |E_f|^2 dx dy} \right\} \text{ [dB]} \quad (1)$$

해석시에는 SSC영역의 도파로의 기초 광흡수계수  $\alpha_i=0 \text{ cm}^{-1}$ 로 가정하였으며, 이 경우 MML은 활성영역에서 출사된 빛이 taper형 SSC영역을 진행하며 산란에 의해 사라지는 방사손실과 접합 도파로간 모드불일치에 의한 모드변환 손실의 합을

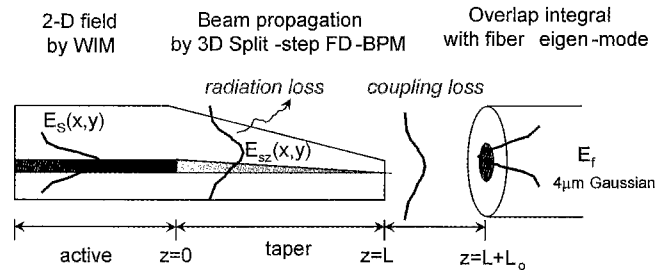


그림 2. SSC-LD와 단일모드 광섬유간의 광결합손실 해석 개념도.

의미한다. 실제 SSC-LD와 광섬유간의 광결합은 그림 2에 나타난 바와 같이 SSC단면(z=L)에서 출사된 빔이 자유공간에서  $L_o$ (working distance) 만큼 진행한 후 광섬유에 결합을 하게 된다. 자유공간에서의 빛의 전파는 Fresnel Diffraction Integral을 이용하여 해석하였다.

SSC구조의 모양에 따른 광결합손실 특성을 조사하기 위해서 여기서는 vertical taper(VT)과 lateral taper(LT) 구조를 가정하였다. SSC영역의 임의의 종방향위치 z에서의 그림 1에 나타난 바와 같이 도파로 두께 및 도파로 폭을 각각  $h(z)$ ,  $W(z)$ 이라 하고 이를 식 (2)와 식 (3)과 같이 모델링하였다.<sup>[9]</sup>

$$h(z) = h_e + (h_i - h_e)(1 - z/L)^n \quad (2)$$

$$W(z) = W_e + (W_i - W_e)(1 - z/L)^m \quad (3)$$

여기서  $h_i$ 와  $h_e$ 는 각각 SSC영역 시작점(z=0)과 SSC영역 끝단(z=L)에서의 도파로 두께를 나타내며,  $W_i$ 와  $W_e$ 는 각각 z=0 및 z=L에서의 도파로폭을 나타낸다. 식 (2), (3)의 지수 n과 m은 taper모양의 변화정도를 나타내며, 앞으로 각각 수직방향 및 수평방향으로의 모양계수(taper profile factor)라 부르기로 한다.

### III. 해석결과 및 검토

#### 3.1. Vertically tapered SSC(VT-SSC) (n≠0, m=0)

SSC영역의 taper구조가 성장층의 수직방향으로만 변화되는 vertically tapered SSC(VT-SSC)구조는 주로 selective MOVPE (metal-organic chemical vapor deposition) 결정성장방법으로 제작된다. 이 방법은 한번의 결정성장에 의해 활성영역과 SSC영역을 제작할 수 있을 뿐만 아니라, 두 영역사이의 광결합 효율을 거의 100% 가깝게 얻을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 SSC영역의 도파로의 밴드갭이 종축방향에 따라 서서히 변화하기 때문에 기초흡수가 다소 크다는 단점이 있다. VT-SSC구조에서 taper의 첫단과 끝단에서의 두께비  $h_i/h_e$ 는 광섬유로의 광결합 효율과 빛의 진행과정에 생기는 손실등에 큰 영향을 미친다.  $h_i/h_e < 3$ 인 경우에는 기초 흡수가 심하고,  $h_i/h_e > 3$ 인 경우는 성장층의 결정성이 나빠지는 문제점이 있다. 이에 여기서는  $h_i/h_e = 3$ 으로 고정하고, taper의 모양, 길이 등에 대한 단일모드 광섬유로의 광결합 손실의 변화를 살펴보았다.<sup>[10]</sup> 그림 3에 n값의 변화에 따른 도파로 두께의 변화를 나타내었다. 그림 4에 수직방향 모양계수 n에 따른 MML의 변화를 진

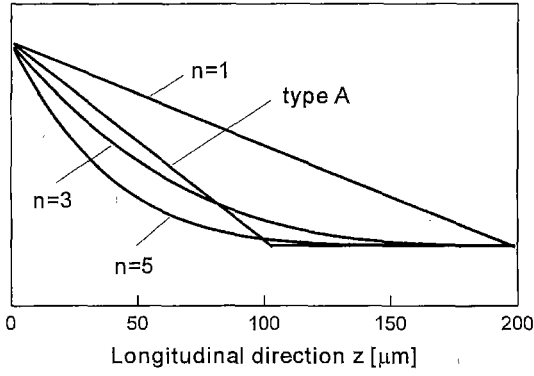


그림 3. 결정성장면에 수직(수평)방향으로의 모양계수  $n$ ( $m$ )에 따른 taper 모양 변화.

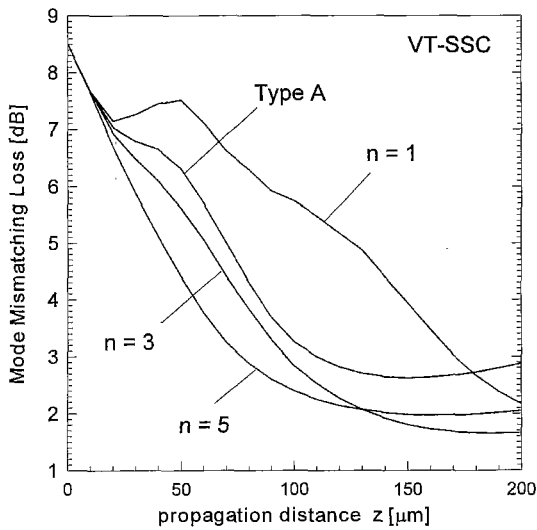


그림 4. 1.3 μm VT-SSC-LD의 수직방향 모양계수  $n$ 에 따른 MML 변화.

행거리  $z$ 에 따라 나타내었다. 해석시에는 SSC의 총길이  $L = 200 \mu\text{m}$ 로 하였다.  $z$ 점에서의 MML 값은  $z=0$ 에서 활성 영역의 2차원 광분포가  $z$ 만큼 진행한 후의 광분포와 cleaved facet의 단일모드광섬유와 butt-joint로 광결합 하였을 경우를 의미한다. 직선도파로로 구성된 기존의 1.3 μm FP-LD의 경우 MML이 8.5 dB인데 반해, 1.3 μm VT-SSC의 MML값은 경우 1.7~3.0 dB 정도로 크게 향상 가능함을 알 수 있다. 또한  $n > 1$ 인 경우가  $n = 1$ (선형)인 경우에 비해 낮은 MML 값을 나타내고 있어 선형 taper 구조 보다 비선형 taper가 유리함을 알 수 있다. 이는  $n = 1$ 인 선형 taper 구조의 경우는 SSC영역을 지나면서 충분한 모드변환이 이루어지지 못하기 때문이다. 그림에서  $n = 3$ 의 경우가 200 μm 진행 후 가장 낮은 MML값을 나타내는데 이는 도파로 구조변화에 기인한 방사손실을 적게 하면서도 충분한 모드변환을 얻을 수 있기 때문이다. 이에 반해  $n = 5$ 의 경우는 급격한 도파로 두께변화에 따라 짧은 거리를 진행하면서 모드변환이 발생하기 때문에 방사손실이 크게 된다.

VT-SSC구조에서 낮은 MML를 얻기 위해서는 출력단 근처에 극히 완만한 taper구조를 삽입하여 충분한 모드 변환이 일

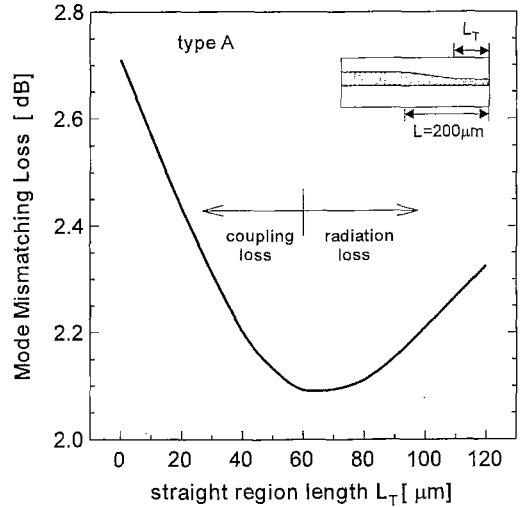


그림 5. Type A 구조에서의 SSC 끝단의  $L_T$ 에 따른 광결합손실 MML의 변화.

어날 수 있는 영역을 확보하는 것이 중요하다. 그림 3을 보면 비선형 taper 구조( $n > 2$ )에서는 taper 모양이  $z$ 축에 따라 처음에는 급격한 taper기울기를 이루다가 나중에는 완만한 taper기울기를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 경향은  $n$ 값이 증가할수록 심하게 나타난다. 그림 3의 taper모양과 그림 4의 MML을 자세히 고찰하여 보면 MML의 감소가 포화되는 지점과 taper 구조의 포화지점과 밀접한 관계를 이루고 있음을 예측할 수 있다. 지금 taper 도파로 두께의 포화 지점을 활성영역 두께의 0.9배만큼 감소한 위치라 하면, 이 위치로부터 대략 60 μm 정도 지난 위치에서 MML값이 포화되는 결과를 얻을 수 있다. 따라서 VT-SSC 구조에서는 taper도파로 끝단에서 약 60 μm 이상의 taper기울기가 완만한 도파로 영역확보가 단일모드 광섬유로의 광결합 효율을 높여주기 위한 기본적인 설계지침이라 생각할 수 있겠다. 그림 5는 그림 3의 type A의 구조에서 총 SSC영역 길이  $L$ 을 200 μm로 고정 시키고, taper형 도파로가 없는 영역의 길이  $L_T$ 를 변화시켜가며 MML의 변화를 살펴본 그림이다. Type A 구조에서도  $L_T = 60 \mu\text{m}$ 에서 가장 낮은 MML 값을 보임을 알 수 있다.  $L_T < 60 \mu\text{m}$  경우 MML이 증가하는 이유는 taper 기울기가 완만하여 충분한 모드변환이 이루어지지 못하기 때문이다. 또한  $L_T > 60 \mu\text{m}$ 의 경우는 MML이 증가하는 이유는 총길이  $L = 200 \mu\text{m}$ 로 고정되어 있기 때문에  $L_T$ 가 길어질수록 taper의 기울기가 급격해져 방사손실이 증가하기 때문이다.

그림 6은 수직방향 모양계수  $n$ 과 SSC영역 길이  $L$ 에 따른 MML의 변화를 나타내었다. 동일한  $n$ 값에 대해서 SSC영역의 길이가 길어질수록 낮은 MML을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 taper의 기울기가 완만하여 저서 방사손실이 줄어들기 때문이다. 또한 동일한 길이에 대해서  $n \geq 3$ 에 대해서는 거의 비슷한 값을 나타내는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 충분한 모드변환이 이루어지고 또한 SSC끝단에서 거의 직선도파로 영역이 60 μm 이상 확보되었기 때문이다. 본 해석에서는 SSC영역의 수동도파로의 도파로손실이 없다고 가정하였으나, 실제 선택 MOVPE방법으로 성장시킨 SSC영역에서는 다소 큰

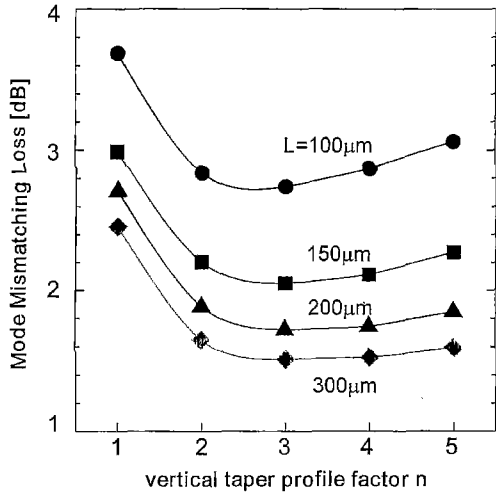


그림 6. 1.3 μm VT-SSC-LD에서 SSC영역 길이 L과 수직방향 모양계수 n에 따른 광결합 손실 MML의 변화.

도파로 손실이 존재한다. 따라서 가능하면 SSC영역의 길이를 줄이는 것이 좋다. 그림 6으로 부터  $L \geq 200 \mu\text{m}$ ,  $n \geq 3$  이상의 조건에서는  $\text{MML} \leq 2 \text{ dB}$  이하가 됨을 알 수 있어 매우 효율이 높은 광결합을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

**3.2. Laterally tapered SSC(LT-SSC) ( $n=0, m \neq 0$ )**

수직방향 taper구조가 주로 결정성장기술로 제어되는 반면에, 수평방향 taper(LT-SSC)구조는 기관의 에칭기술로 제작되어 진다.<sup>[11]</sup> 수평방향 taper 구조는 출력 방향으로 도파로폭이 줄어드는 down-taper 뿐만 아니라 도파로폭이 늘어나는 up-taper도 쉽게 제작 가능하다. 그림 7은 결정방향으로는 활성영역의 도파로 구조와 SSC영역의 구조가 서로 같고, SSC영역의 도파로폭을 변화시키면서 해석한 MML 변화를 나타낸다. 해석 시에는 SSC영역의 길이  $L = 200 \mu\text{m}$ 로 고정하였으며, 활성영역의 도파로폭  $W_1 = 1.0 \mu\text{m}$ 라 가정하였다. SSC영역 끝단에서의 도파로폭  $W_2$ 가 줄어들거나 늘어나는 모두의 경우에 대해서

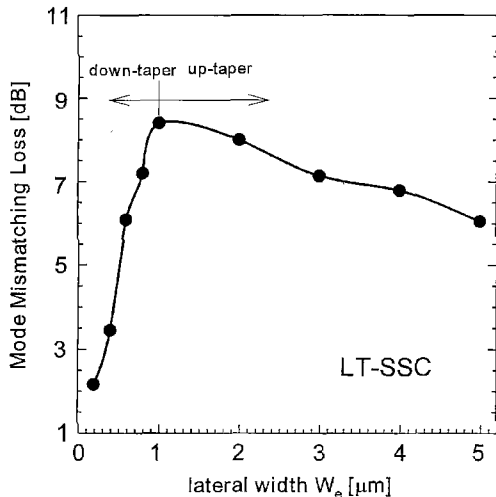


그림 7. 수평방향 SSC-LD에서 SSC끝단의 도파로 폭  $W_2$ 에 따른 광결합손실 MML의 변화. 여기서  $W_1 = 1 \mu\text{m}$ 라 하였다.

MML가 감소하는 경향을 보여 준다. 그러나  $W_2$ 가 줄어드는 down-taper경우가 up-taper의 경우에 비해서 매우 큰 폭으로 MML값을 줄일 수 있음을 알 수 있다. Up-taper의 경우는  $W_2 = 5 \mu\text{m}$  정도로 넓혀도 직선도파로( $W_2 = 1.0 \mu\text{m}$ )에 비해 약 2.7 dB정도의 개선이 기대되어 그리 큰 광결합효율의 향상을 기대할 수 없다. 또한 SSC영역에 활성층과 같은 도파로 구조를 채용하기 때문에 도파로폭인 넓은 SSC영역에도 전류를 주입하여야 하고 이로 인해 발진개시전류의 상승, 도파모드의 FFP에 불안전성과 같은 현상이 나타날 수 있는 단점이 있다. Down-taper의 경우는  $W_2 = 0.2 \mu\text{m}$  정도까지 줄이면 MML값을 거의 2 dB 정도까지 줄일 수 있다. 이 경우에는 도파로폭이 좁기 때문에 매우 정교한 에칭기법이 요구된다. 또한 수직방향의 SSC 구조는 결정성장법에 의해 taper구조를 만들기에 매우 부드러운 도파로 경계면이 나타나는데 반해, 수평방향 taper의 경우는 에칭에 의해 제작되기 때문에 도파로의 불균일성에 의해 크고 이에 따라 큰 산란손실이 발생과 비대칭 FFP(far-field pattern)이 나타날 수 있음에 유의하여야 한다.

그림 8은 1.3 μm LT-SSC FP-LD에서  $W_2 = 0.2 \mu\text{m}$ 이고, SSC 영역 길이  $L = 200 \mu\text{m}$ 일 때의 진행거리에 따른 MML변화를 모의실험한 결과이다. VT-SSC에서와 마찬가지로 LT-SSC에서도 직선도파로의 경우에 비해 MML가 약 5 dB이상 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 VT-SSC에서는 MML의 변화가 수직방향 모양계수 n에 따라 큰 차이를 나타내지는 않는데 반해, LT-SSC에서는 수평방향 모양계수 m에 따른 MML감소 차이가 비교적 큰 폭으로 나타남을 확인할 수 있다. 이는 동일한 SSC영역길이와 모양계수에 대해 VT-SSC의 경우 도파로 두께가 수 nm 변화하는데 반해, LT-SSC에서는 수백 nm 까지 변화하기 때문에 VT-SSC에서 보다 방사손실의 영향이 크기 때문이다. 이상으로부터 LT-SSC의 경우에는 VT-SSC에서 보다 taper 기울기를 완만히 해줄 필요가 있으며, 최소 MML 값을 주는 수평방향 모양계수  $m = 2$ 로서 VT-SSC의  $n = 3$  보다 작은 값이다.

SSC영역에서 taper의 기울기를 조절하는 방법으로는 모양

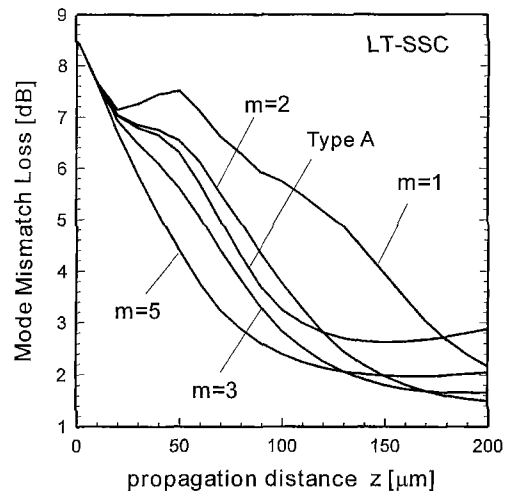


그림 8. 1.3 μm LT-SSC-LD에서 수평방향 모양계수 m에 따른 광결합손실 MML의 변화.

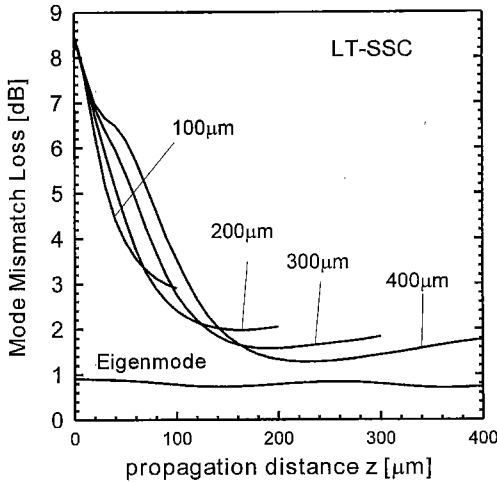


그림 9. 1.3 μm LT-SSC-LD에서 SSC영역길이 L에 따른 광결합손실 MML의 변화.

계수 이외에 taper길이 L을 조정하는 방법이 있다. 그림 9는 수평방향 모양계수  $m=5$ 인 때의 L에 대한 MML의 변화를 나타낸 것이다.  $L < 200 \mu\text{m}$  영역에서는 MML값이 길이를 길게 함에 따라 급격히 변화하는데 반해,  $L > 200 \mu\text{m}$  영역에서는 그 감소폭이 둔화되어 있음을 알 수 있다. VT-SSC의 SSC영역의 기초흡수만 작게하면 길이를 길게하는 것이 가능하지만, LT-SSC의 경우는 SSC영역이 활성영역과 같은 매질로 되어 있기 때문에 L의 길이에 따라 SSC-LD의 발진 특성이 나빠지는 문제점이 있다. 이러한 이유로 LT-SSC의 경우는  $m \geq 2$ ,  $L = 200 \mu\text{m}$  정도가 적당하다고 생각된다. 그림내에 eigenmode는  $W_0 = 0.2 \mu\text{m}$ 의 도파모드 빛이 직선도파로를 진행할 때의 MML 값을 나타낸 것이다. 따라서 eigenmode의 MML값은 거의 출력광과 단일모드 광섬유의 고유모드간의 모드 불일치만으로 야기된 광결합 손실이라 할 수 있다. m과 L에 따른 최종 MML값과 eigenmode의 MML값의 차이는 주어진 SSC 구조에서의 방사손실과 충분한 모드 변환이 일어나지 못해 야기된 광결합손실의 합으로 볼 수 있다.

### 3.3. Alignment Tolerance

반도체 레이저와 단일모드 광섬유와 수동정렬방식에 의한 직접결합은 광부품비 및 인건비의 절감 등 많은 장점이 있으나 정렬 오차에 대한 광결합 효율의 민감한 변화는 수동 직접결합 방식의 채용을 어렵게 한다. 이에 SSC-LD와 단일모드 광섬유간의 정렬오차에 대해서 조사하였다. 그림 10은 SSC-LD의 출력 단면에서 출사된 빛이 자유공간  $L_0$  만큼 진행한 후 단일모드 광섬유와의 MML값을 계산한 축방향 정렬오차 허용도를 나타낸 결과이다. 여기서  $L_0$ 를 작업길이(working distance)라 한다. 해석 시 SSC영역 길이  $L = 200 \mu\text{m}$ 로 하였다. SSC-LD출력단에서 단일모드 광섬유와 직접결합 시 MML가 가장 적은 값으로 최적화된 SSC구조들( $n=3$  혹은  $m=2$ )에 대해서는 최적의 작업길이  $L_0$ 가 존재하며 그 길이는 약 20~25 μm임을 알 수 있다. 또한  $0 \mu\text{m} \leq L_0 \leq 30 \mu\text{m}$  영역에서는  $L_0$ 에서 그리 큰 영향을 받지 않는데 반해,  $L_0 \geq 30 \mu\text{m}$ 에

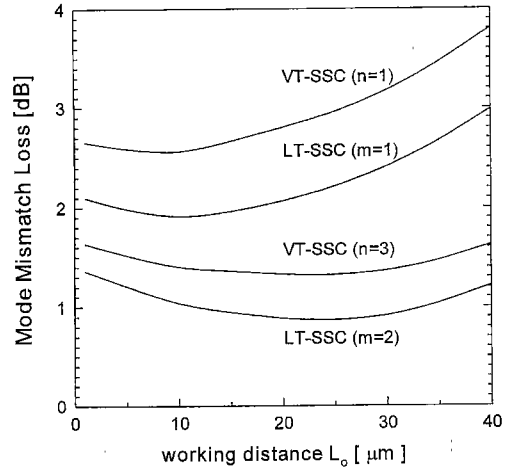


그림 10. 단일모드 광섬유와 여러종류의 SSC-LD와의 작업거리에 따른 광결합손실 MML의 변화.

서는  $L_0$ 가 증가함에 따라 MML 값도 지속적으로 증가하는 모습을 볼 수 있었다. SSC구조에서 충분히 평면파에 가깝게 모드변환이 일어나지 않은  $n=1$  혹은  $m=1$ 의 경우에는 최소 MML값을 주는  $L_0$  값이 10 μm 이내로 짧게 나타났으며  $L_0$  값이 그 이상에 대해서는 급격히 증가하는 모습을 나타낸다. 실제로 직선도파로 구조의 일반적인 LD의 경우는  $L_0 \sim 0 \mu\text{m}$ 에서 최소 손실을 나타내는데, 이로 인해 광섬유와 LD의 직접결합 시 양단면의 접촉이 발생해 소자들의 단면을 다치는 경우가 종종 발생한다. SSC-LD는 광결합효율이 좋아진다는 점 이외에, 축방향 정렬 오차가 수십 μm로 넓기 때문에 광섬유와 LD 결합 시 수율을 향상시킬 수 있는 또 다른 현실적인 장점이 있다.

그림 11은 수직방향 정렬 오차를 광결합 손실을 작업길이  $L_0 = 20 \mu\text{m}$ 에서 계산한 것이다. 앞에서의 축방향 정렬 오차의 경우와는 달리 횡방향의 정렬오차에 대한 특성은 SSC구조에 따른 큰 차이는 알 수 없었다. 그러나 광섬유와의 광결합 효

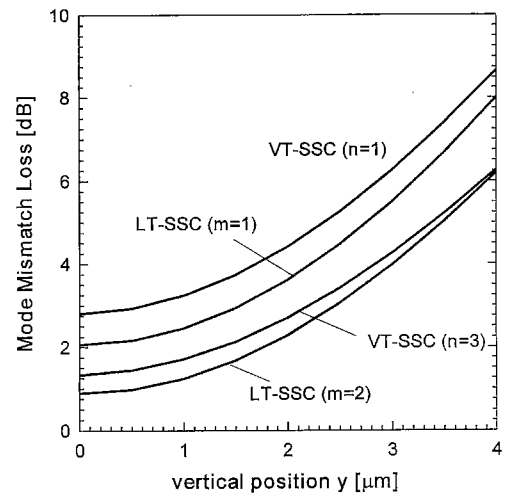


그림 11. 단일모드 광섬유와 여러종류의 SSC-LD와의 횡방향 정렬 오차에 대한 광결합손실 MML의 변화.

율을 높이기 위해서 이용되는 lens를 이용한 광결합 손실이 1 dB 높아지는 횡방향 정렬오차 허용도가 약  $\pm 0.5\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 인데 반하여, SSC-LD의 경우 이경우는 광결합 손실이 1 dB 높아 지는데 약  $\pm 1.7\ \mu\text{m}$ 의 정렬오차허용도를 나타내 약 3배 정도의 개선이 있음을 알 수 있었다. 본 해석에서는 단일모드 광섬유의 spot-size를  $4\ \mu\text{m}$ 를 대상으로 하였으나, 더욱 넓은 spot-size 광섬유를 채용할 경우 횡방향정렬 오차 허용도는 더욱 개선 가능할 것으로 예측된다.

#### IV. 결 론

광가입자망용 광원으로서 주목받고 있는 모드변환기(SSC)가 집적된  $1.3\ \mu\text{m}$  SSC FP-LD의 SSC영역의 taper 구조가 단일 모드 광섬유와의 광결합 효율에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. Taper 구조로서는 선택성장으로 제작 가능한 vertical taper(VT)와 로광작업과 에칭에 의해 제작 가능한 lateral taper(LT) 구조를 대상으로 하였다. 결정성장면에 수직인 방향으로 성장층의 두께가 변하는 VT-SSC 구조에서는 선형 taper ( $n=1$ )에 비선형 taper( $n>1$ ) 구조가 유리하고, 비선형 taper구조에서는 taper도파로 끝단에서 약  $60\ \mu\text{m}$  이상의 taper기울기가 완전한 도파로 영역확보가 매우 중요함을 알 수 있었다. SSC영역 길이  $L \geq 200\ \mu\text{m}$ , vertical taper profile factor  $n \geq 3$ 의 taper 모양을 갖는 VT-SSC구조에서 광결합손실  $\text{MML} \leq 2\ \text{dB}$  이하를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

LT-SSC구조는 기관의 에칭기술로 제작되어 지기 때문에 출사단으로 진행함에 따라 도파로폭이 줄어드는 down-taper와 도파로폭이 늘어나는 up-taper도 쉽게 제작 가능하다. Up-taper와 down-taper의 경우를 비교하여 보면 down-taper의 경우가 광결합효율, 발진개시전류, 발진모드의 안정성 측면에서 유리함을 알 수 있었다. LT-SSC는 VT-SSC에 비해 taper 모양계수가 적은 값이 좋다. 낮은 광결합손실을 주는 down-taper LT-SSC구조로서는  $L = 200\ \mu\text{m}$ ,  $m = 2$  정도가 적당하다는 것을 밝혔다.

SSC-LD와 단일모드 광섬유간의 정렬오차에 대해서 조사하였다. 상기의 최적화된 SSC구조들( $n=3$  혹은  $m=2$ )에 대해서는 약  $20\sim 25\ \mu\text{m}$  정도의 최적의 작업길이  $L_0$ 가 존재함을 알 수 있었으며, 축방향에 대한 정렬오차는 수십  $\mu\text{m}$ 가 됨을 알 수 있었다. 이로 인해 SSC-LD는 SMF와의 광결합시 높은

광결합효율을 얻을 수 있다는 점 이외에 수율을 크게 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 축방향 정렬 오차의 경우와는 달리 횡방향의 정렬오차에 대한 특성은 SSC구조에 따른 큰 차이는 없었다. 그러나 SSC-LD의 경우 1 dB 이내의 광결합 손실을 허용하는 조건하에서 약  $\pm 1.7\ \mu\text{m}$ 의 정렬오차허용도를 나타내 일반적인 LD에 비해 약 3배 정도의 개선이 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] K. Yokoyama, N. Sekino, T. Hirono, Y. Thomori, and Y. Kawaguchi, *J. of Lightwave Technol.* **16**, 8, 1456 (1998).
- [2] M. Saruwatari and K. Nawata, *Applied Optics* **18**, 1847 (1979).
- [3] G. Nakagawa, K. Miura, S. Sasaka, and M. Yano, *J. of Lightwave Technol.* **14**, 1519 (1996).
- [4] I. F. Lealman, L. J. Rivers, M. J. Harlow, and S. D. Perring, *Electron. Lett.* **30**, 20, 1685 (1994).
- [5] I. Moerman, G. Vermeire, M. Dondt, W. Vanderbauwhede, J. Blon-delle, G. Coudenys, P. Van Daele, and P. Demeester, *Microelectron. J.* **25**, 675 (1994).
- [6] Y. Yoshimoto, K. Kawano, Y. Hasumi, T. Takeuchi, S. Kondo, and Y. Noguchi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6**, 208 (1994).
- [7] M. Ming and K. Liu, *Principle and Applications of Optical Communications* (Irwin, 1996).
- [8] M. Aoki, M. Komori, M. Suzuki, H. Sato, M. Takahashi, T. Ohtoshi, K. Uomi, and S. Tsuji, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 479 (1996).
- [9] H. Kobayashi, T. Yamamoto, M. Ekawa, T. Watanabe, T. Ishikawa, T. Fujii, H. Soda, S. Ogita, and M. Kobayashi, *IEEE J. of Quantum. Electron.* **3**, 6, 1384 (1997).
- [10] K. Kawano, M. Kohtoku, H. Okamoto, Y. Itaya, and M. Naganuma, *IEEE J. of Quantum. Electron.* **3**, 6, 1351 (1997).
- [11] Y. Inaba, M. Kito, T. Nishikawa, M. Ishino, and Y. Matsui, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9**, 6, 722 (1997).

### Spot-size converter design of an 1.3 $\mu\text{m}$ SSC-FP-LD for optical subscriber network

Jongin Shim<sup>†</sup>, Jaehyun Jin, and Yungseon Eo

*School of Electrical Engineering & Computer Science, Hanyang University, Kyungki-do 425-71, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: jishim@giga.hanyang.ac.kr*

(Received July 18, 2000 ; Revised manuscript received October 12, 2000)

The waveguide structure effects of a spot-size converter (SSC) of a 1.3  $\mu\text{m}$  FP(Fabry-Perot)-LD(Laser Diode) were investigated. Its coupling efficiency and alignment tolerance with a single-mode fiber (SMF) were carefully examined by using a 3-dimensional BPM (Beam Propagation Method). It was shown that the formation of enough length of straightened waveguide around the end of the SSC region can substantially improve the optical coupling efficiency for a vertically tapered SSC. In contrast, a down-taper structure for a laterally tapered SSC has superior characteristics to an up-tapered one. We suggested good SSC structures which can provide a high coupling efficiency as well as a large alignment tolerance with an SMF.

*OCIS codes* : 130.1750, 140.2020.