

## 모드변환기가 집적된 반도체 광증폭기에서의 유효단면반사율의 구조 의존성

이재일 · 심종인<sup>1</sup> · 어영선

한양대학교 전자컴퓨터공학부  
(425-791) 경기도 안산시 사1동 1271번지

(2000년 7월 15일 받음, 2000년 8월 25일 수정본 받음)

최근 모드변환기가 집적된 진행파형 반도체 광증폭기(SSC-TW-SOA)가 광섬유와의 광결합 효율 향상 및 저가격화를 위해 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 모드변환기의 구조가 단면 반사율에 미치는 영향을 실험 및 이론적으로 조사하였다. SSC-TW-SOA의 유효단면반사율을 낮추기 위해서는 수직 및 수평방향으로 충분히 모드변환을 행하고 동시에 기운단면 구조를 채용하는 것이 매우 효과적임을 이론적 및 실험적으로 확인하였다. 수직 및 수평방향의 모드변환기가 집적된 TW-SOA에 20  $\mu\text{m}$  길이의 창구조, 7° 기운단면, 1% 무반사 코팅을 도입함으로써 0.1 dB 이하의 작은 ASE ripple를 얻을 수 있었다.

OCIS codes : 250.5980, 230.0250, 230.7370.

### I. 서 론

1980년 중반에 in-line repeater, pre-amplifier, booster amplifier 등으로 개발된 반도체 광증폭기(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)는 현재 광스위치, 광 논리소자, 파장변환기 등으로 그 응용범위를 넓혀가고 있다.<sup>[1-4]</sup> SOA는 출력 단면반사율 크기에 따라 공진형과 진행파형으로 나누어지는데, 공진형 SOA는 진행파형(TW: Traveling Wave Type) SOA에 비해 좁은 대역폭과 낮은 포화출력파워 등의 단점이 있어 현재는 TW-SOA가 주류를 이루고 있다.<sup>[5]</sup> 이러한 TW-SOA에서는 SOA 내에서 공진현상이 발생하지 않도록 낮은 단면 반사율을 얻는 것이 무엇보다 중요하다.

단면의 유효반사율을 낮추는 방법으로는 증폭기 출력단에 창(window)구조를 삽입하는 방법, 광도파로 축에 대해 기운 단면을 채용하는 방법, 단면에 무반사 코팅을 하는 방법 등이 알려져 있다.<sup>[6-8]</sup> 일반적으로 다층 무반사 코팅방법은 넓은 파장영역에서  $10^{-2}\sim 10^{-3}$  정도의 낮은 반사율을 손쉽게 얻을 수 있기 때문에 많이 사용된다. 그러나  $10^{-5}\sim 10^{-6}$  정도의 지극히 낮은 반사율이 요구되는 TW-SOA에서는 정확한 두께와 정확한 굴절율을 가지는 유전체막을 다층으로 균일하게 증착하여야 하는 공정상의 어려움이 있어 현실적으로 다층 무반사 coating 방법만으로는 무반사 특성을 얻는데 한계가 있다. 이러한 이유로 진행파형 SOA의 경우는 창구조, 기운단면, 다층무반사 coating 방법을 혼합한 방법들이 주로 사용하고 있다.

반도체 광증폭기 모듈은 단일모드 광섬유와의 광결합된 형태로 일반적으로 제작된다. 광섬유와 SOA 간의 광결합 효율을 높이는 것은 SOA 모듈의 이득성능을 향상시키는데 필수적인데, 기존의 SOA와 단일모드 광섬유 간의 광축을 약 1  $\mu\text{m}$  이하로 엄밀하게 정렬하여야 하는 어려움이 있어 많은 시

간이 소요되는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서 최근 들어 SOA의 출력단에 모드변환기(SSC: Spot-Size Converter)를 집적한 SSC-SOA가 활발히 연구되고 있다. SSC-SOA에서는 출력빔의 크기가 단일모드 광섬유의 도파모드 크기와 유사하게 되어 광결합효율과 정렬오차 허용도를 향상시킬 뿐만 아니라, array형 SOA 모듈의 경우 수율을 대폭으로 개선시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 SSC-SOA의 경우 출력단 SSC 광도파로 구조가 기존의 활성영역의 도파로만으로 이루어진 경우에 비해 많이 다르기 때문에 단면반사율에도 차이가 있을 것으로 예상되나, 아직 SSC 영역의 광도파로 구조가 단면의 반사율에 미치는 영향에 대해서 자세히 보고된 바가 없다. 본 논문에서는 SSC-SOA에서 SSC 구조와 단면 반사율과의 상관관계에 대해서 실험적 및 이론적으로 조사하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 제작한 SSC-SOA의 소자 구조, III절에서는 실험결과 및 검토, IV절에서는 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약한다.

### II. 제작한 1.55 $\mu\text{m}$ SSC-SOA의 구조

그림 1은 모드변환기가 집적된 진행파형 반도체 광증폭기의 그림이다. 광증폭기의 구조는 laterally tapered double-heterostructure(LT-DH), laterally tapered separate-confinement heterostructure (LT-SCH), laterally and vertically tapered separate-confinement-heterostructure(LTVT-SCH) 3종류이며, 각각에 대한 주요 구조변수를 표 1에 정리하였다. LT-DH는 도파영역이 DH 구조에 모드변환기가 단지 수평방향으로 가늘어진 구조이고, LT-SCH는 도파영역이 SCH 구조에 모드변환기가 수평방향으로 가늘어진 구조이고, LTVT-SCH는 도파영역이 SCH 구조에 모드변환기가 수평, 수직 두 가지 방향으로 가늘어지는 구조이다. 모드변환기를 수직 및 수평으로 가늘어지게 하는 방법으로는 각각 습식화학에칭과 선택적 MOCVD(Metal Organic

<sup>1</sup>E-mail. jishim@giga.hanyang.ac.kr

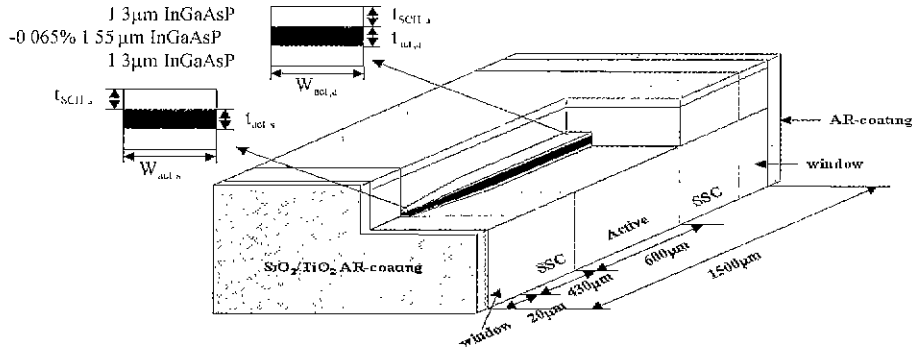


그림 1. 제작한 진행파형 광증폭기의 구조 개념도

표 1. 제작한 모드변환기 집적 반도체 광증폭기들의 주요 구조 파라미터들

Type	Straight Active Region			End of SSC Region		
	$W_{act,a}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$t_{act,a}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$t_{sch,a}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$W_{act,s}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$t_{act,s}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$t_{sch,s}$ [ $\mu\text{m}$ ]
LT-DH	1.0	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0
LT-SCH	1.0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1
LTVT-SCH	1.0	0.2	0.1	0.2	0.067	0.033

Chemical Vapor Deposition) 성장법을 사용하였다. 활성영역은 두께 0.2  $\mu\text{m}$ 의 InGaAsP( $\lambda_g = 1.55 \mu\text{m}$ ) bulk 활성층에 편파 무의존 특성을 위해 -0.065%의 인장 strain을 주었다. 양쪽 0.1  $\mu\text{m}$  두께의 InGaAsP( $\lambda_g = 1.3 \mu\text{m}$ ) SCH층은 활성영역에 높은 광구속을 위해 사용하였다. 무반사 코팅은 반사율이 1%인  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  단일층의 층을 사용하였다.

### III. 유효단면반사율 해석 방법

SSC-TW-SOA는 빛의 진행방향에 따라 활성영역, SSC영역, 창구조영역, 무반사막 코팅 단면, 공기의 서로 다른 매질로 구성되어 있다. SSC-SOA의 단면의 반사효과 해석을 간단화하기 위해서 여기서는 SSC영역을 전파하는 동안 발생하는 빛의

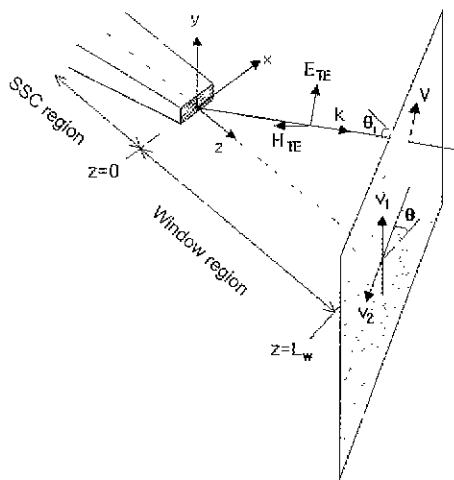


그림 2. SSC-TW-SOA의 유효단면 반사율을 해석하기 위한 구조도

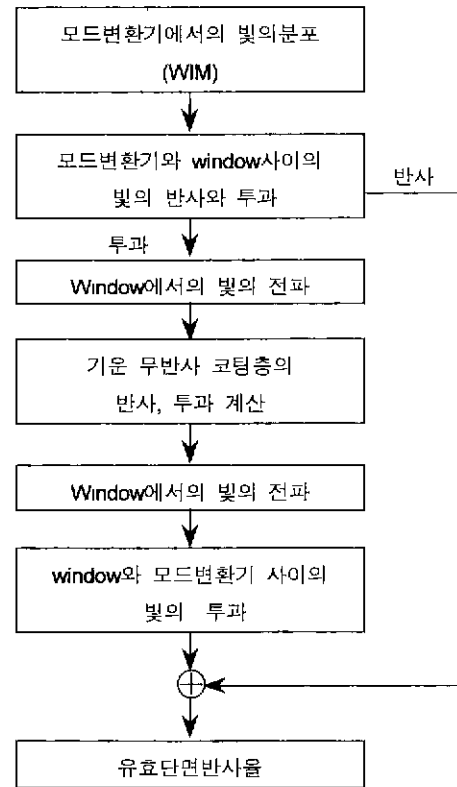


그림 3. SSC-TW-SOA 해석 흐름도.

산란효과를 무시하였다. 이는 SSC영역에서의 광도파로 구조가 매우 천천히 변화하여 대부분의 광이 도파모드로 진행되는 경우이며 SOA 활성영역에서 파라본 유효단면반사율은 SSC 끝단에서의 유효단면반사율과 동일하게 된다. 이러한 가정하에 SSC-SOA의 유효반사율  $R_{eff}$ 의 해석에 사용한 해석모델을 그림 2에 나타내었다.  $R_{eff}$ 의 해석에는 크게 나누어 (i) SSC 끝단에서의 2차원 도파모드의 전자계 분포 해석, (ii) SSC 및 창영역 혹은 창영역과 무반사코팅막 사이와 같은 불연속 경계면에서의 반사 및 투과 해석, (iii) 창영역에서의 전파와 같은 균일 매질에서의 빛의 전파, (iv) 반사광의 SSC 영역 도파모드로의 광결합을 등이 필요하며, 그림 3의 해석순서도와 같이 이들 방법의 조합을 통해 이루어진다. 다음은 상기(i)-(iv)의 해석 방법을 순차적으로 설명한다.

**3.1. 유효반사율**

유효반사율  $R_{eff}$ 는 SSC 영역 끝단( $z=0_-$ )에서 출사된 빛이 SOA 단면 구조에 의해 반사되어 다시 SSC 영역의 도파모드에로의 결합된 양으로 정의된다. SOA 단면( $z=0_-$ )에서의 반사에 의한 x-방향의 전계성분은 SSC영역과 창영역의 불연속면( $z=0$ )에서의 전계 반사성분  $E_{x,r1}(x, y)$ 과 창영역을 지나 무반사 단면 코팅막에서 반사되어 돌아온 잔류반사 성분  $E_{x,r2}(x, y)$ 의 합으로 구성되어 진다.  $E_{x,r1}(x, y)$ 는 SSC 영역으로부터 창영역을 투과, 창영역으로부터 SSC 영역으로의 투과, 창영역에서의 양방향으로의 전파 해석을 통해 얻어진다.

$$R_{eff} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(E_{x,r1}^* + E_{x,r2}^*) dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_x|^2 dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_{x,r1} + E_{x,r2}|^2 dx dy} \quad (1)$$

여기서 윗첨자 \*는 켈레복소수,  $E_x(x, y)$ 는 SSC 영역의 도파모드의 x방향으로의 전계분포이다.

**3.2. 모드변환기에서의 빛의 분포**

먼저 SSC 영역 끝단에서 2차원 도파모드의 전자계분포는 Weighted Index Method(WIM)를 사용해 해석하였다.<sup>10)</sup> WIM 통해 Quasi-TE 및 Quasi-TM 도파모드 분포를 얻을 수 있는데, 본 연구에서는 Quasi-TE 모드를 사용하였다. Quasi-TE 모드로 해석하는 이유는 제작한 SSC-SOA 경우 활성영역에서의 광도파로 폭이 두께에 비해 다소 넓어서 Quasi-TM 모드에 비해 Quasi-TE 모드의 광이득이 다소 크게 만들어 지는 경우가 많기 때문이다. WIM 방법을 이용하여 2차원 분포를 구하는 경우는  $H_y(x, y)$ 성분을 기준함수로 취하여 해석한 후, 다른 전자계 성분들은 Maxwell 방정식으로 구하는 것이 유리하다. 이와 같이 얻어진 SSC 영역 끝단의 Quasi-TE 도파모드의 전계  $E(x, y, z)$  및 자계  $H(x, y, z)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{E}(x, y, z) = \{E_x(x, y)\hat{x} + E_y(x, y)\hat{y} + E_z(x, y)\hat{z}\} \exp(-j\beta z), \quad (2)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = \{H_y(x, y)\hat{y} + H_z(x, y)\hat{z}\} \exp(-j\beta z). \quad (3)$$

여기서  $\beta$ 는 전파정수이다.

**3.3. 불연속 경계면에서의 반사 및 투과**

해석코자 하는 SSC-SOA구조에서는 SSC영역과 창영역 사이, 창영역과 무반사코팅 단면 사이에 불연속 경계면이 존재한다. 창영역과 무반사 코팅단면은 균일한 매질로 되어 있는 반면 SSC영역은 2차원 굴절을 분포의 도파로 구조로 되어 있어 해석이 다소 복잡하다. 본 해석에서는 SSC영역의 도파모드만을 고려의 대상으로 하고 있음을 고려하여 SSC영역의 굴절을 분포를 식 (4)의 관계식을 만족하는 유효굴절을  $n_{eff}$ 을 갖는 균일한 영역으로 취급하였다.<sup>10)</sup>

$$n_{eff} = \beta/k_0 \quad (4)$$

여기서  $k_0$ 는 진공중의 전파상수이다. 이러한 방법으로 SSC 영역과 창영역에 존재하는 불연속면에 의한 빛의 반사와 투과 문제를 SSC 영역과 창영역에 각각  $n_{eff}$ ,  $n_w$ 의 균일한 매질 사

이의 문제로 단순화하였다. 또한 창영역과 무반사 코팅 단면에서의 반사량 해석 시에는 무반사막과 공기층을 하나의 매질로 보고 TE 편파광이 수평 경계면에 수직 입사하는 경우 잔류반사율이 1%가 되도록 무반사막의 굴절율을 2.5936이라 가정하였다.

입사광의 세기가 공간적으로 분포되어 있는 경우 균일한 두 매질 사이의 반사 및 투과 해석은 입사광을 서로 다른 파수 벡터를 갖는 평면파의 합으로 표현하고 이 평면파의 반사 및 투과문제라 생각할 수 있다. 이 경우 임의의 평면파의 불연속면에 대한 반사는 평면파의 전자계 성분을 경계면에 대해 TE파 및 TM파의 합성으로 표현하고, 각각의 성분에 대해 Fresnel 법칙을 적용함으로써 쉽게 해석할 수 있으며, 이 방법은 타 방법들에 비해 물리적인 현상을 이해하는데 관한 장점이 있다.<sup>10)</sup> 여기서 TE파 및 TM파라 함은 입사파의 전계 및 자기성분이 각각 불연속 경계면에 대해 평행한 경우를 칭한다. 지금 불연속 경계면을  $z=0$ 라고 하자. 경계면으로 입사하는 x, y, z 방향의 전자계 성분을 대표하는 SSC 영역에서 창영역으로 입사하는 y방향으로의 자기 성분  $H_y(x, y)$ 를 Fourier 변환함으로써 공간에 임의의 점(x, y, z)에서의 평면파의 합으로 표현하면 식 (5), (6)과 같이 된다.

$$H_y(x, y) e^{-jk_z z} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x dk_y H_{yk} e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (5)$$

$$H_{yk}(k_x, k_y) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dy H_y(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} \quad (6)$$

여기서  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ 는 각각 x, y, z 방향으로의 파수 벡터를 나타내며 식 (7)을 만족한다.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff}\right)^2 \quad (7)$$

임의의 wave vector 를 갖는 평면파의 전자계 성분들은 식 (5)의와 Maxwell 방정식을 통해 얻어진다.

$$H_{zk} = 0. \quad (8)$$

$$H_{zk} = \frac{k_x}{k_z} H_{yk}, \quad (9)$$

$$E_{zk} = \frac{\omega\mu}{k_z} H_{zk} = \frac{k_x^2}{\omega\epsilon_0 n^2 k_z} H_{yk}, \quad (10)$$

$$E_{yk} = -\frac{k_x k_y}{\omega\epsilon_0 n^2 k_z} H_{yk}, \quad (11)$$

$$E_{zk} = \frac{k_x}{\omega\epsilon_0 n^2} H_{yk}. \quad (12)$$

이상으로부터 임의의 wave vector  $k(=k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z})$ 로 진행하는 평면파의 성분을 식 (13)과 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$E_k = E_{zk} \hat{x} + E_{yk} \hat{y} + E_{zk} \hat{z}. \quad (13)$$

$$H_k = H_{y\hat{k}} + H_{z\hat{k}} \quad (14)$$

파수 벡터  $k$ 를 갖는 평면파의 불연속 경계면에서의 반사와 투과는 입사 평면파를 불연속 경계면에 대해 TE 및 TM파로 분리하고 이를 Fresnel 반사법칙을 이용하면 쉽게 해석 되어 질 수 있다. 입사파의 파수 벡터  $k$ 에 수직이면서, 불연속 경계면 평면위에 있는 단위벡터를  $V$ 라 하고 이를 경계평면에서의 기준 단위 벡터  $v_1$ 과  $v_2$ 의 선형결합으로 나타내자.

$$V = \alpha v_1 + \beta v_2 \quad (15)$$

$V$ 는 단위 벡터이고,  $k$ 와 서로 수직이므로 다음 식 (15), (16)를 만족한다.

$$\alpha_2 + \beta_2 = 1. \quad (16)$$

$$V \cdot k = \alpha v_1 \cdot k + \beta v_2 \cdot k = 0. \quad (17)$$

식 (16)과 식 (17)로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 다음과 같이 구하여진다.

$$\alpha = \mp \frac{1}{\sqrt{\frac{v_2 \cdot k}{v_1 \cdot k} + \frac{v_1 \cdot k}{v_2 \cdot k}}}, \quad (18)$$

$$\beta = \pm \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_2 \cdot k}{v_1 \cdot k}\right)^2 + 1}}. \quad (19)$$

반사면에 수평이고  $k$ 에 수직인 단위 벡터  $V$ 에 입사전계  $E$ 와 입사자계  $H$ 를 각각 정사영하면 TE파 전계성분  $E_{TE}$  및 TM파 자계성분  $H_{TM}$ 을 알 수 있다.

$$V \cdot E = E_{TE}, \quad (20)$$

$$V \cdot H = H_{TM} \quad (21)$$

식 (20)과 식 (21)로부터 해석된 경계면에서의 입사광의 TE파 및 TM파에 대한 전자계 성분은 알면, 평면파의 Fresnel 법칙을 사용하여 간단히 전자계의 반사계수  $r$  및 투과계수  $t$ 를 해석할 수 있다.

$$\text{TE파: } r = \frac{E_{TE,r}}{E_{TE,i}} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta + \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (22)$$

$$t = \frac{E_{TE,t}}{E_{TE,i}} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta + \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (23)$$

$$\text{TM파: } r = \frac{E_{TM,r}}{E_{TM,i}} = \frac{n_r^2 \cos \theta - \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_i}}{n_i^2 \cos \theta + \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (24)$$

$$t = \frac{E_{TM,t}}{E_{TM,i}} = \frac{2 n_r \cos \theta_i}{n_r^2 \cos \theta + \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (25)$$

여기서 첨자  $i, r, t$ 는 각각 입사, 반사, 투과를 뜻하며,  $n_r = n_2/n_1$ 으로  $n_1$ 은 입사층의 굴절율이며  $n_2$ 는 투과층의 굴절율,  $\theta_i$ 는 불연속 경계면에 수직인 벡터와 입사파 파수 벡터  $k$ 가 이루는 각도를 나타낸다.

### 3.4. 창영역에서의 전자계 성분의 전파

창영역에서의 빛의 전파는 SSC영역을 투과한 전자계 성분의 전파와 무반사 코팅 단면에서 반사된 빛의 SSC영역으로의 반사가 있다. 창영역에서의 전파는 SSC영역과 창영역 경계를 투과하거나 혹은 무반사 단면을 반사한 평면파 전자계 성분들의 진행으로 생각할 수 있다. 따라서  $z=0$ 에서의 각각의 전자계 성분을 대표적으로  $g_i(x, y)$ , 이의 Fourier 계수를  $g_{i,k}(k_x, k_y)$ 라 할 경우, 거리  $z$ 를 진행한 후의 전자계 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_i(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x dk_y G_{i,k}(k_x, k_y) \exp\left\{ \pm j(k_x x + k_y y + \sqrt{(k_0 n_w)^2 - k_x^2 - k_y^2} z) \right\} \quad (26)$$

여기서  $n_w$ 는 창영역의 굴절율이며, 첨자 1은  $x, y, z$ 이다. 식 (26)의 지수함수내의  $\pm$ 는 각각  $\mp z$  방향으로 진행하는 빛을 의미한다.

## IV. 결과 및 검토

그림 1의 창영역, 기운 출력단면, 무반사 코팅을 가지는 반도체 광증폭기 구조에서, 유효단면반사율  $R_{eff}$ 를 좌우하는 빛의 반사성분에는 모드변환기와 창영역 사이에서의 반사성분과 그 경계를 투과하여 창영역을 지나 무반사코팅층에서 반사되어 다시 모드변환기로 들어오는 반사성분의 두 가지가 있다. 우선 모드변환기 영역과 창영역 사이의 반사성분에 대해서 알아 보자. 모드변환기와 창영역사이의 빛의 반사에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 모드변환기영역의 유효굴절율과 창영역의 굴절율에 차이이다. 모드변환기 영역의 유효굴절율은 모드변환기 도파영역의 너비와 두께 등에 의존한다. 그림 4는 표 1의 정리된 3가지 구조에 대해서 다른 도파로구조는 일정하다고 가정하고, 도파로폭  $W_{act,s}$ 만이 변화하는 경우 SSC영역의 유효굴절율의 변화를 나타내었다. 동일한  $W_{act,s}$ 에 대해 LT-SCH, LT-DH, LTVT-SCH순으로 높은 유효 굴절율을 갖는다.

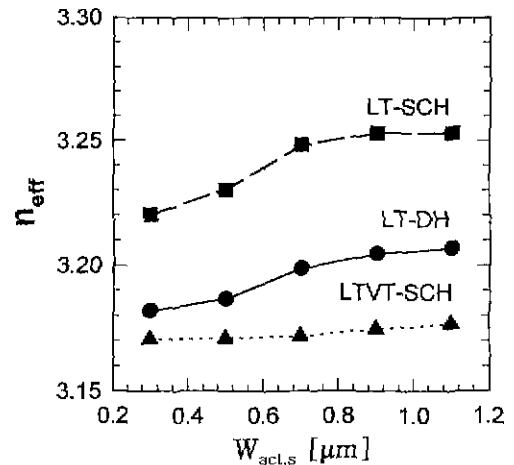


그림 4. SSC 끝단에서의 광도파로 폭이  $W_{act,s}$ 에 따른 유효굴절율  $n_{eff}$ 의 변화.

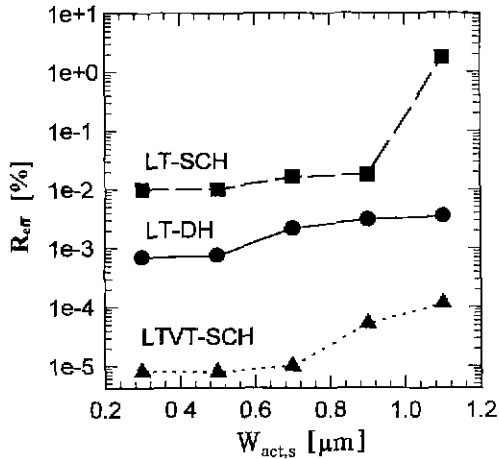


그림 5. SSC 끝단에서의 광도파로 넓이  $W_{act,s}$ 에 따른 SSC영역과 창영역의 반사면에 의한 유효단면반사율  $R_{eff}$ 의 변화.

LT-DH 구조는 LT-SCH구조에서 도파영역에 빛이 모이게 하는 SCH층이 없어 상대적으로 낮은 유효 단면 반사율을 갖으며, LTVT-SCH구조는 LT-SCH구조에 비해 모드 변환기의 두께가 1/3만큼 작은 것으로 활성영역의 두께의 감소에 의해 유효굴절율이 낮아진다.

그림 5는 모드변환기 영역을 유효 굴절율 층으로 보았을 때 모드변환기 끝단의 너비에 따르는 모드변환기와 window사이의 반사율을 계산한 것이다. 여기서는 SSC영역의 도파로와 창영역의 도파로가 수직으로 형성되어 있다고 가정하였다. 창영역이 InP로 되어 있어 굴절율이 일정하기 때문에 SSC영역의 유효굴절율이 InP에 가까울수록, 즉 SSC영역의 도파로 영역이 줄어들수록 두영역 사이의 반사가 줄어들다. LTVT-SCH 구조의 경우 모든 너비에 대해 window영역의 굴절율( $n_{InP} = 3.17$ )과 모드변환기의 굴절율 차이가  $10^{-4}$  이하로 약  $10^{-6}$  이하의 매우 낮은 반사율을 가지고 있는데 반해, LT-SCH 구조는 약  $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 의 높은 단면 반사율을 나타내었다. 특히 활성영역의 이득을 높이기 위해 제작된 LT-SCH에서  $W_{act,s} > 1 \mu m$ 인 경우에는 반사율이 1% 이상으로 되어 반도체 광증폭기에서의 공진현상을 충분히 억제할 수 없게 된다. 따라서 진행파형 반도체 광증폭기에서 창구조를 삽입할 때는 폭이 줄어드는 모드변환기를 집적시키거나 혹은 모드변환기를 집적시키지 않을 때에는 도파로 구조를 매우 weakly guiding 구조가 되도록 함이 중요함을 알 수 있다.

반도체 광증폭기에서  $R_{eff}$ 에 영향을 주는 다른 요소로서는 무반사 코팅막에서 반사한 빛에 의한 영향이다. 이  $R_{eff}$ 에 영향을 주는 요인으로는 창영역 길이, 도파로와 단면과의 기운 단면각  $\theta$ , 무반사 코팅의 반사율 등이 있다. 본 해석에서는 해석을 간단히 하기 위해서 무반사 코팅의 반사율은 1%로 고정하였는데, 코팅막의 반사율이 R로 변하는 경우는  $R_{eff}$  해석결과에  $R/R_{eff}$ 를 곱하여 주면 된다. 그림 6에 모드변환기 끝단의 너비가  $0.2 \mu m$ 로 일정하고 단면각  $\theta = 0^\circ$ 인 경우, 창영역 길이  $L_w$ 에 따른  $R_{eff}$  해석결과를 나타내었다. 창영역 길이를 증가시키면 세 구조 모두에 대해서  $R_{eff}$ 가 줄어들음을 알 수 있다.  $L_w$ 에 따른  $R_{eff}$ 의 저감효과는 LT-SCH, LT-DH, LTVT-SCH순으

로 크게 나타났는데, 이는 LT-SCH, LT-DH, LTVT-SCH 순으로 SSC 단면에서의 광구속계수가 크기 때문이다. SSC 단면에서의 광구속계수가 작은 도파로에서의 광분포에는 파수 벡터  $k_x$  및  $k_y$  값이 작은 평면파 성분을 많이 포함되어 있다. 이에 반해 광구속계수가 큰 경우의 광분포에는 파수 벡터  $k_x$  및  $k_y$  값이 큰 평면파 성분들이 상대적으로 많이 포함되어 있다. 주로  $k_x$  및  $k_y$  값이 적은 평면파 성분들로 구성된 빛은 SSC 단면에서 출사광 분포와 SSC 단면으로 되돌아온 반사광의 분포사이에 그리 큰 차이가 없게 된다. 그러나 주로  $k_x$  및  $k_y$  값이 큰 평면파 성분들로 구성된 출사광의 경우는 반사광 분포가 출사광 분포에 비해 많이 퍼진 형태를 띄게 된다. 따라서  $L_w$ 에 따른  $R_{eff}$ 의 저감효과는 파수 벡터  $k_x$  및  $k_y$  값이 큰 평면파 성분의 양에 많을수록,  $L_w$ 가 길수록 커지게 된다.

창영역을 이용하여 유효단면 반사율을 낮추는 방법은 원칙적으로는 창영역 길이를 충분히 증가시키면 단면 반사율에 의한  $R_{eff}$ 를 원하는 만큼은 감소시킬 수 있다. 그러나 일반적으로 출사빔의 모양은 주로 광소자의 기능에 맞추어 설계되기 때문에 출사빔의 모양이 어느 정도는 결정되어 있다. 이 경우  $R_{eff}$ 를 낮추기 위해서 창영역 길이를 너무 길게 하면 창영역을 전파 하면서 빛의 분포가 너무 넓어져 무반사코팅막으로 구성된 출사단에 도달하기 전에 창영역 내의 금속 pad 등에 의해 반사가 발생하여 결국 출력빔의 FFP(Far-field pattern)에 찌그러지게 된다. 이를 억제하기 위해서는 창영역의 두께를 충분히 두껍게 해야 이는 장시간의 결정성장을 해야 하는 문제점이 있다. 또한 광도파로 출력단(본 연구의 경우 SSC영역 끝단)과 광섬유와의 결합거리에 제한을 두게 되어 결국 광섬유와의 결합 효율을 낮추게 된다. 이러한 이유로 인해  $R_{eff}$ 를 위한 창영역 길이는 본 연구의 경우 최대 약  $20 \mu m$ 가 적절하다고 사료된다.

그림 7은 무반사 코팅은 1%, 창영역 길이를  $20 \mu m$ 로 고정하였을 경우 세 구조에 대한 단면각의 변화에 대한 유효단면 반사율이다. 단면각이 기울임 효과는 무반사 코팅막에서 반사되는 잔류 반사성분의 중심을 모드변환기의 도파로 중심에서 벗어나게 하여  $R_{eff}$ 를 낮추게 하는 것이다. 세 구조에서 모두

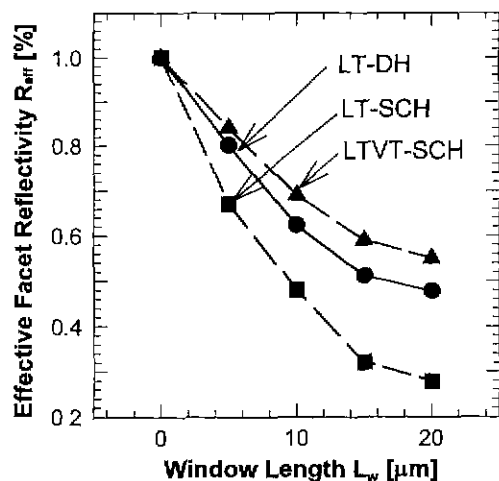


그림 6. 세종류의 TW-SOA에 대한 창영역길이에 따른 유효단면반사율  $R_{eff}$ 의 변화. 단면은 SSC영역 광도파로에 수직 ( $\theta = 0^\circ$ )이며, 단면 반사율 R은 1%로 하였다.

단면각을 증가시키에 따라  $R_{eff}$ 가 감소하나, LTVT-SCH, LT-DH, LT-SCH 순으로 단면의 기운각 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. LTVT-SCH의 경우가 기운단면각에 가장 크게 감소하는 효과가 있는데, 이는 LTVT-SCH에서 SSC 끝단에서 출사되는 빛은 타 구조의 경우에 비해 파수 벡터  $k_x$  및  $k_y$  값이 적은 평면파 성분들로 주로 구성되어 있기 때문이다. 즉,  $k_x$  및  $k_y$  값이 적은 평면파 성분들은 SSC 광도파로와 같은 축방

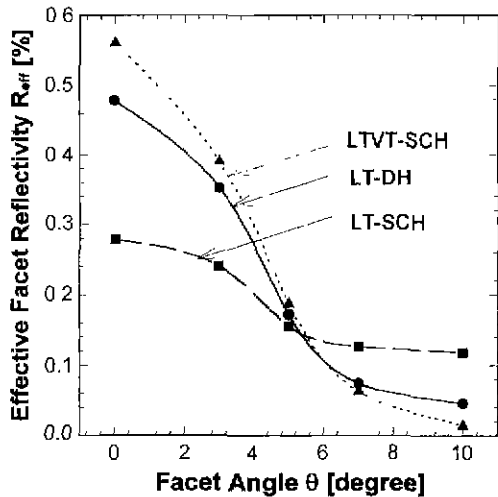


그림 7. 세종류의 TW-SOA에 대한 기운단면각  $\theta$ 에 따른 유효단면 반사율  $R_{eff}$ 의 변화. 창영역 길이  $L_w$ 는  $20\ \mu\text{m}$ , 단면반사율  $R$ 은 1%라 가정하였다.

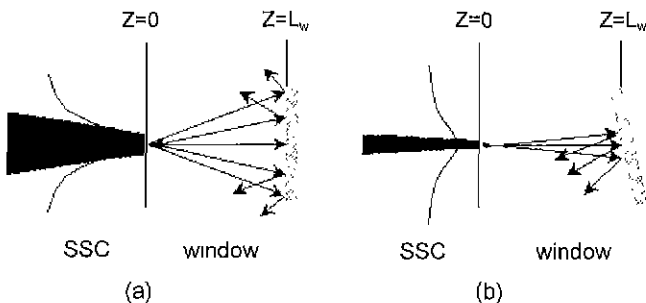


그림 8. SSC 영역의 도파로 구조에 따른 유효단면 반사율 저감 개념도. (a) 광구속이 큰 경우, (b) 광구속이 작은 경우. (a)의 경우는 창영역 길이  $L_w$ 를 길게 하는 방법, (b)의 경우는 기운단면을 채용하는 것이 유용함을 알 수 있다.

향으로 진행하기 때문에 기운단면의 무반사코팅단면에서 반사 후에는 SSC 도파로 축에서 대부분 벗어나게 되어 SSC 광도파로와의 광결합율이 낮아져  $R_{eff}$ 가 줄어들게 된다. 이에 반해 LT-SCH처럼 SSC단면 출사빔이 파수 벡터  $k_x$  및  $k_y$  값이 큰 평면파 성분들로 구성되어 있는 경우는 기운단면의 효과가 작아지게 된다.

무반사 코팅단면을 SSC도파로 중심에 대해 기운 각도를 크게 하면 할수록  $R_{eff}$ 를 낮출 수는 있으나, 이는 광섬유와 광증폭기 간의 광결합을 어렵게 하는 문제점이 있다. 일례로  $7^\circ$  정도 기운 단면각을 갖는 반도체 광증폭기 구조에서 출력 빛은 Snell의 법칙에 따라 단면의 수직축으로 부터 약  $21^\circ$ 의 상대적으로 큰 각을 갖고 출사하게 된다. 출사각이  $20^\circ$  이상이 되면 광섬유가 부착된 반도체 광증폭기 모듈의 제작시 광결합 효율의 저감 및 광소자와 광섬유의 매치 등 많은 문제점을 야기시킨다. 이상의 이유로 단면의 기울임 각도는 약  $7^\circ\sim 10^\circ$  정도가 적당하다고 생각된다. 그림 8에 SSC도파로 구조에 따른  $R_{eff}$  저감원리를 도식적으로 나타내었다.

그림 9에 1%의 무반사 코팅,  $20\ \mu\text{m}$ 의 창영역 길이,  $7^\circ$ 의 기운단면각을 갖도록 제작한 LTVT-SCH, LT-DH, LT-SCH에 대해 단면에 모두 약 1%정도의 무반사 코팅을 행한 후 단면으로 부터 출사된 ASE(Amplified Spontaneous Emission) spectrum을 측정하여 나타내었다. 활성영역 길이는 모두  $600\ \mu\text{m}$ 로 일정하며, ASE 측정시 주입전류는 모두 100 mA로 하였으며, spectrum analyzer의 분해능은 0.1 nm로 하였다. LTVT-SCH는 약 0.1 dB, LT-DH는 0.2 dB, LT-SCH는 약 1 dB로 ripple의 크기가 나타났다. 이러한 ripple들은 SSC 영역과 창영역, 창영역과 무반사코팅단면에서 반사되는 반사광들의 간섭에 의해서 발생된다. Ripple의 크기는 활성영역의 이득계수와 전류반사율의 크기에 따라 변화하지만, 본 연구에서 대상으로 한 세가지 구조의 활성영역 구조가 거의 같기 때문에 ripple의 크기는 결국 전류반사율  $R_{eff}$ 의 크기 정도를 대변한다고 할 수 있다.<sup>[1]</sup> 그림 7의 해석결과 중  $\theta=7^\circ$ 에 해당되는  $R_{eff}$  값은 실험에 이용된 소자에서 기대되는 유효반사율이 된다. 이로 부터 LTVT-SCH, LT-DH, LT-SCH 순으로 적은 ASE ripple이 해석결과에서도 예측되어 본 연구의 타당성을 확인할 수 있었다. 그림 8에서 LT-SCH와 LT-DH에서는 작은 ripple이외에 장주기의 큰 ripple이 관측되고 있는데 이는 SSC영역과 창영역에서의 반사광과 무반사코팅막에서의 반사광의 간섭에 의해서 발생되

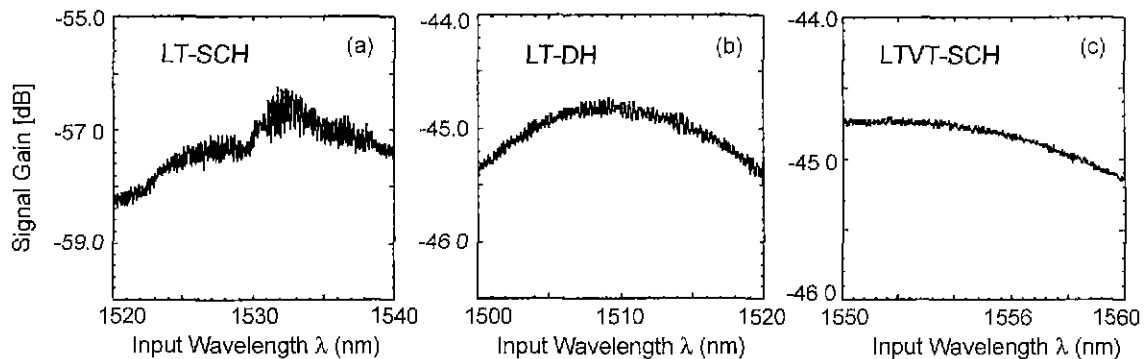


그림 9. 제작한 세종류의 SSC-TW-SOA의 ASE spectra.

는 것으로 ASE spectrum 해석결과 알 수 있었으며, 이에 대해서는 추후 구체적으로 보고할 예정이다.

## V. 결 론

우리는 단일모드 광섬유와 높은 광결합효율을 갖게 하기 위해서 모드 변환기가 집적된 진행파형 증폭기에서 유효 단면 반사율을 낮추는 방법에 대해 이론적 및 실험적으로 연구하였다. SSC영역이 집적된 진행파형 반도체 광증폭기에 있어서 SSC영역의 도파로 구조가 유효단면반사율에 미치는 영향에 대해서 저자들이 이는 범위 내에서는 아직 구체적으로 밝혀진 바가 없다. 연구 결과 SSC영역의 도파로폭 및 두께가 큰 모드변환기가 집적되어 있는 경우(도파로의 광구속 정도가 큰 경우)는 창영역의 길이를 조절하는 방법이 유리하고, 이에 반해 도파로의 광구속이 작은 경우에는 기운단면 구조를 채용하는 것이 중요함을 밝혔다. 이는 광구속이 큰 경우에는 SSC영역으로부터 창영역으로 출사되는 빛 가운데 도파로 축방향으로부터 벗어나는 평면파 성분이 많고, 따라서 창영역 길이를 길게하면 무반사단면에서 반사되어 SSC영역의 도파모드로 재결합되는 양이 줄어들기 때문이다. 광구속이 큰 도파로 구조에 직접 창영역을 접합시키는 방법은 근본적으로 창영역 길이를 길게하여 단면의 반사효과를 줄인다 하여도 도파로와 창영역 단면 사이의 경계에서 반사가 크기 때문에 근본적으로 반사율을 줄이는데에는 한계가 있다. 이에 반해 광구속이 작은 경우에는 SSC영역으로부터 창영역으로 출사되는 빛 가운데 도파로 축방향으로부터 진행하는 평면파 성분이 많아 창영역 길이를 길게 하는 방법은 단면반사저감에 큰 효과가 없고, 무반사 단면에 각도를 주는 방법이 효과적이다. 이상의 연구 결과로부터 반도체 광증폭기의 유효반사율을 저감시키기 위해서는 SSC영역의 광구속계수를 작게하고 창영역길이를 10  $\mu\text{m}$  이상 도입하며 무반사단면에 7° 이상의 각도를 주는 방법이 매우 효과적임을 알 수 있었다.

이상의 고찰과 더불어 SSC영역의 광구속계수가 서로 다른

3개의 LTVT-SCH, LT-DH, LT-SCH 구조에 대해 1%의 무반사 코팅, 20  $\mu\text{m}$ 의 창영역 길이, 7°의 기운단면각을 채용한 진행파형 광증폭기를 제작하였다. 주입전류를 100 mA로 동작시켰을시 ASE광 스펙트럼을 측정하였다. LTVT-SCH는 약 0.1 dB, LT-DH는 0.2 dB, LT-SCH는 약 1 dB로 ripple의 크기가 나타나, 유효적인 단면 반사율이 LTVT-SCH, LT-DH, LT-SCH순으로 나타나 본 연구의 결과가 타당함을 입증하고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] H. Ghafouri-Shiraz, *Fundamentals of Laser Diode Amplifiers*, John Wiley & Sons, New York (1996)
- [2] S. Suzuki, T. Terakado, K. Nagashima, A. Suzuki, and M. Kondo, *J. Lightwave Technol.* **10**, 894 (1986).
- [3] R. Fortenberry, A. J. Lowery, W. L. Ha, and R. S. Tucker, *Electron. Lett.* **27**, 14, 1305 (1991)
- [4] T. Durhuus, *J. Lightwave Technol.* **14**, 6, 942 (1996).
- [5] Y. Yamamoto, *Coherence, Amplification, and Quantum Effects in Semiconductor Lasers*, John Wiley & Sons, New York (1991).
- [6] I. Cha, M. Kitamura, H. Hommou, and I. Mito, *Electron. Lett.* **25**, 18, 1241 (1989).
- [7] C. E. Zah, J. S. Osinski, C. Caneau, S. G. Menocal, L. A. Reith, J. Salzman, F. K. Shokoohi, and T. P. Lee, *Electron. Lett.* **23**, 19, 990 (1987).
- [8] T. Saitoh, T. Mukai, and O. Mikami, *IEEE J. Lightwave Technol.* **3**, 2, 288 (1985).
- [9] P. C. Kendall, M. J. Adams, S. Ritchie, and M. J. Robertson, *IEE Proc. A* **134**, 8, 699 (1987).
- [10] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*, Part A, Academic Press, New York (1978).

## Structural dependence of the effective facet reflectivity in spot-size-converter integrated semiconductor optical amplifiers

Zail Lhee, Jongin Shim<sup>1</sup>, and Yungseon Eo

School of Electrical Engineering & Computer Science, Hanyang University, Kyungki-do 425-791, KOREA

<sup>1</sup>E-mail: jishim@giga.hanyang.ac.kr

(Received July 15, 2000. Revised manuscript received August 25, 2000)

Traveling wave type semiconductor optical amplifiers integrated with spot-size-converter (SSC-TW-SOA) have been extensively studied for the improvement of coupling efficiency with single-mode fiber and for the cost reduction in a packaging. In this paper the structural dependence of the spot-size-converter on the effective facet reflectivity  $R_{eff}$  was experimentally as well as theoretically investigated. It was shown that not only a sufficient mode-conversion in a SSC region along the lateral and transverse directions but also an introduction of angled-facet were very essential in order to reduce  $R_{eff}$ . Very small ripple less than 0.1 dB in an amplified spontaneous emission spectrum was observed with the fabricated SSC-TW-SOA which consists of the window length of 20  $\mu\text{m}$ , facet angle of 7°, and antireflection-coated facet of 1% reflectivity.

OCIS codes : 250.5980, 230.0250, 230.7370.