
윈도우 영역을 갖는 측방향으로 경사진 SCH-SLD의 설계에 관한 연구

황상구* · 김정호* · 김운섭* · 김동욱* · 안세경* · 홍창희*

A Study on the Design of Laterally Tilted SCH-SLD with Window Region

Sangku Hwang · Jeongho Kim · Weounseub Kim · Tongwook Kim · Sekyung An · Tchanghee Hong

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-302-005-2) 지원으로 수행되었음

요 약

광통신용 광섬유의 최저손실 파장영역인 $1.55\mu\text{m}$ 에서 고출력으로 안정하게 동작하는 SLD를 설계하기 위하여 이론적인 해석을 수행하였다. 활성영역과 SCH층의 재료는 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 를 이용하였다. 활성영역의 측방향과 횡방향 모드해석으로부터 단일모드 고출력 동작을 위한 광전력분포와 광가둠계수를 구하였으며, 이들 계산으로부터 최대 광가둠계수를 얻기 위한 SCH층의 조성과 두께를 계산하였다. 낮은 반사도를 얻기 위하여 후면에 윈도우 영역을 두었고 활성영역과 윈도우 영역의 계면이 측방향으로 각도를 가지게 하였으며 가우시안빔 근사와 모드해석으로부터 반사도를 계산하였다. $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP 를 SCH층으로 하였을 때 최대의 광가둠계수를 얻기 위한 SCH층의 두께는 $0.08\mu\text{m}$ 정도이었다. 10~4정도의 반사도를 얻기 위해서는 활성층의 두께를 $0.2\mu\text{m}$, SCH층의 두께를 $0.08\mu\text{m}$ 로 하였을 때 무반사코팅을 하지 않을 경우 윈도우 영역의 길이는 $100\mu\text{m}$ 정도이고, 반사도 1% 정도의 무반사 코팅을 할 경우 $10\mu\text{m}$ 정도가 된다.

측면 경사각이 $10\sim 15^\circ$ 이면 반사도는 10~3정도가 된다. 이들 결과로부터 AR코팅을 하지 않고도 윈도우 영역의 길이와 측면 경사각을 적당히 조절한다면 안정적으로 동작하는 SLD의 제작이 가능하다는 것을 알 수 있다.

ABSTRACT

Theoretical analyses have been tried to design high power and stable operating SLD at $1.55\mu\text{m}$ wavelength range which is the lowest absorption wavelength in optical fiber. The materials of active layer and SCH layer were chosen as conventional $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ quaternary composition systems.

From the transverse mode and the lateral mode analyses of waveguide, the optical power distributions and the optical confinement factor have been studied for single-mode high power operation. According to these analyses, it was calculated the composition and the thickness of SCH layer to obtain the maximum optical confinement factor.

In order to obtain low values of the reflectivity, we used the window region and the lateral tilted angle

* 한국해양대학교 전자통신공학과
접수일자: 2001. 7. 31

between the active region and window region. And the reflectivity of SLD was calculated with the gaussian beam approximation and mode analysis.

From these researches, it was confirmed for several results to fabricate the efficient and stable SLD. In case of using $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP SCH layer, the layer thickness was obtained $0.08\mu\text{m}$ to get the maximum optical confinement factor. Using $0.2\mu\text{m}$ active layer thickness and $0.08\mu\text{m}$ SCH layer thickness, the window region length is about $100\mu\text{m}$ without AR coating, $10\mu\text{m}$ in 1% AR coating to obtain about 10-4 reflectivity. When the tilted angle is about $10\sim 15^\circ$, the reflectivity is about 10-3.

From these results, if the window region length and tilted angle were controlled appropriately in given device structure, it was confirmed that it is possible to fabricate the stable SLD without AR coating analytically.

I. 서론

SLD(Superluminescent Diode)는 반도체레이저(LD)와 발광 다이오드(LED)의 중간적인 특성으로 인하여 광섬유센서의 광원으로 주로 사용되는데, 특히 광섬유센서의 하나인 Fiber-Optic Gyroscope용 광원으로 가장 적당한 것으로 알려져 있다.[1] SLD는 높은 이득특성 때문에 같은 전류 밀도에서 LED보다 큰 출력을 광섬유 속으로 보낼 수 있으며, 또한 광섬유 센서에서 가간섭 길이가 짧고, laser잡음이 적으며,[2] 광쾌환 잡음에 민감하지 않다. SLD의 광대역 특성은 Rayleigh 후방산란 잡음, 편광잡음, 광섬유 시스템의 비선형 Kerr effect 때문에 생기는 잡음 등에 대해서 민감하지 않기 때문에 광섬유 센서 시스템에서 생기는 잡음을 크게 줄일 수 있다.

본 논문은 통신용 광섬유를 사용하여 센싱루프를 구성한 광섬유 자이로스코프의 광원으로 사용하기 위한 SLD의 제작 전단계 연구로서 수행된 것이다.

본 논문에서는 광통신용 광섬유의 최저 손실 파장 영역인 $1.55\mu\text{m}$ 파장대역의 InGaAsP/InP 재료계를 이용하여 효율적으로 동작하는 SLD를 제작하기 위하여 윈도우 영역을 갖는 측방향으로 경사진 SCH(Separate Confinement Heterostructure)-SLD에 대하여 도파층의 최적 설계, 낮은 반사도를 얻기 위한 구조의 최적 설계에 대하여 기술하였다.

활성층을 설계하기 위하여 맥스웰 파동방정식을 이용하여 횡방향과 측방향에 대한 모드 이론과 PBH(Planar Bur-ied Heterostructure)-LD에 대한 도파 메카니즘을 이용하여 SLD 내부의 필드 분포와 광가둠계수를 구하였다.

SLD가 안정하게 동작하기 위해서는 계면에서의 반사도가 낮아야 하며, 가장 일반적인 방법은 무반사막 코팅(Anti-reflecting Coating:AR)을 하는 것이다. 그러나 실제 AR 코팅만으로 반사도를 충분히 낮추는 것은 상당히 어렵기 때문에 본 연구에서는 활성영역과 윈도우 영역의 계면에 측방향으로 경사각을 주어 반사도를 낮추는 것에 대하여 조사하였다.

II. SCH-SLD의 모드해석

본 연구에서는 윈도우 영역을 갖는 PBH 형태의 측방향으로 경사진 SCH-SLD를 제작하기 위한 기본 구조로 결정하고 이를 해석하였다. 이 소자는 활성층이 굴절률이 낮은 재료로 둘러싸여 캐리어 가둠과 광가둠이 우수하며 LD의 경우 낮은 임계전류와 안정된 측방향 기본 모드 발진, 고신뢰성과 같은 우수한 특성을 가지는 구조로 되어 있다.[3~6]

SLD가 안정된 동작을 할 수 있도록 후면에 윈도우 영역을 두어 반사도가 낮아지도록 하였으며, 또 활성층과 윈도우 영역의 계면에 측방향으로 각도를 가짐으로써 반사도가 더욱 더 낮아지도록 하였다.

SLD의 동작특성은 각 영역에서 파동방정식을 구하여 이론적으로 해석을 하였으며, 해석을 단순화하기 위하여 도파로는 대칭형구조를 가진 것으로 가정하였다.

2.1 SCH-SLD의 모델링

SCH-PBH 구조는 낮은 임계 전류 밀도와 큰 방출 파워에서의 작은 빔 발산을 구현할 수 있는 소자구조로 알려져 있다.[7~11] 그림 1은 설계 및 제작하고자

하는 윈도우 영역을 갖는 측방향으로 경사진 SCH-SLD의 구조를 나타낸 것이다.

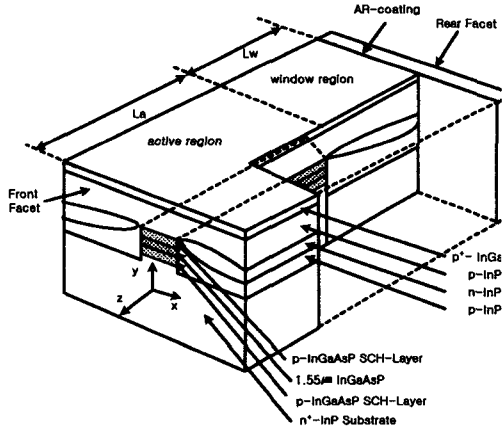


그림 1. 윈도우 영역을 갖는 측방향으로 경사진 SCH-SLD의 구조도

Fig. 1. Schematic drawing of Laterally Tilted SCH-SLD with Window Region

해석을 위한 각 층의 굴절률은 MSEO 방법[12]으로 구하였으며, 그 결과 활성층인 발진파장 1.55μm의 InGaAsP는 3.53, SCH층인 발진파장 1.3μm인 InGaAsP의 경우는 3.39 그리고 InP층은 3.17이었다.

그림 2는 SCH-PBH-SLD의 횡단면도이며, 그림 3은 길이 방향의 단면도이다.

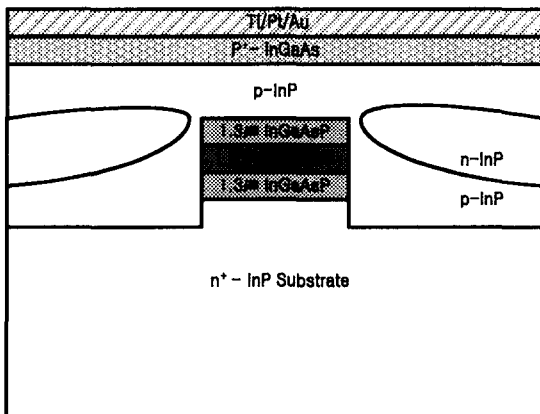


그림 2. SLD의 횡단면도.

Fig. 2. Transverse cross section of SLD

소자의 특성해석을 위하여 횡방향과 측방향으로 나

누어서 각각을 5층 및 3층 평판 도파로 구조로 분리하여 각각의 경우에 대하여 유효굴절률 근사법[13,14]을 이용하여 해석을 하였다.

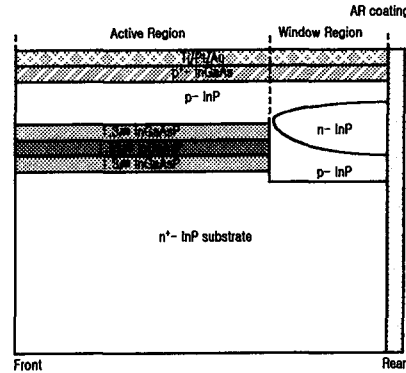


그림 3. SLD의 측면도

Fig. 3. Longitudinal cross section of SLD

맥스웰 방정식에 의한 횡방향과 측방향의 파동 방정식은 각각 다음 식들과 같이 주어진다.[15]

$$\frac{d^2 E_x(y)}{dy^2} + \{k_0^2 n_i^2 - \beta^2(x)\} E_x(y) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + [k_0^2 \{n_{eq}(x) + \Delta n_{eq}(x)\}^2 - \beta_z^2] E_y(x) = 0 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 $E_x(y)$ 와 $E_y(x)$ 는 각각 횡방향과 측방향의 전계분포를 나타내며 n_i 는 횡방향의 각 층의 굴절률을 나타낸다. 횡방향 도파모드의 전파상수 $\beta(x) = k_0 n_{eq}(x)$ 이며 $n_{eq}(x)$ 는 횡방향의 도파모드가 느끼는 등가굴절률을 나타내며 k_0 는 진공 중의 파수를 나타낸다.

식 (2)에서 $\Delta n_{eq}(x)$ 는 주입된 캐리어의 개수 N 에 의해 측방향으로 발생하는 굴절률의 변화를 나타내는 것이다.

중방향 도파모드의 전파상수는 $\beta_z = k_0 \bar{n} + j\bar{\alpha}/2$ 이고 여기서 \bar{n} 과 $\bar{\alpha}$ 는 두께가 d_3 이고 폭이 W 인 직각 도파로에 의해 주어지는 등가굴절률과 흡수계수이다. 일반적으로 모드해석은 임계전류값 이상에서 다루게 되며, 이 경우에 이득이 흡수보다 훨씬 큰 값을 가지므로 흡수계수 $\bar{\alpha}$ 는 무시할 수가

있다.

2.2 횡모드 해석

횡모드 해석 모델은 대칭형의 5층 평판 도파로를 사용하였으며, 이론 해석의 간편화를 위하여 광이 클래드층까지 거의 갇힌다고 가정을 하였다.[16]

그림 4에 횡모드 해석을 위한 대칭 SCH 구조를 나타내었다. 본 해석에서는 기본 TE 모드만 고려하였는데 이는 활성층의 두께가 0.2 μm 보다 작은 경우에는 실험적으로 기본 TE 모드만이 관측되는 유일한 모드가기 때문이다.

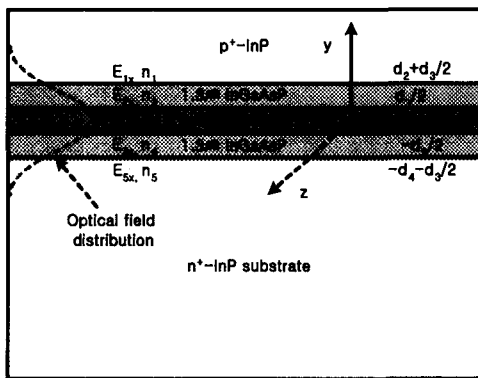


그림 4. 횡모드 해석을 위한 대칭 SCH 평판 도파로
Fig. 4. Symmetric Slab waveguide for transverse mode analysis

그림 4의 도파로는 대칭 구조의 도파로이므로 식 (1)로 주어지는 횡방향 파동방정식의 해는 대칭성을 고려하여 5층 전체에 대한 해석을 할 필요가 없으며, 단지 3층에 대하여 해석을 하면 되고, 따라서 각 층의 전계분포는 다음 식들로 표현된다.

$$E_{1x}(y) = A_1 \exp^{-\gamma_1(y - (d_2 + d_3/2))} \quad (3a)$$

$$E_{2x}(y) = A_2 \cos(k_2 y) + B_2 \sin(k_2 y) \quad (3b)$$

$$E_{3x}(y) = A_3 \cos(k_3 y) \quad (3c)$$

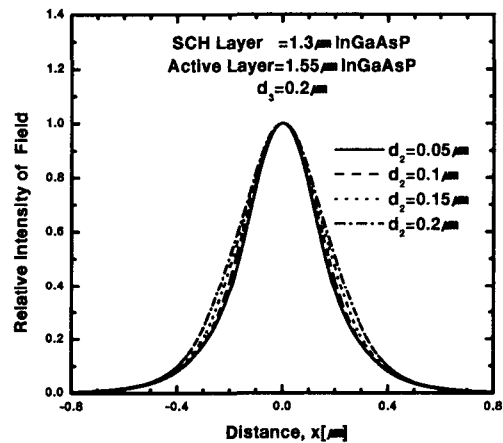
여기서 각 층의 전파상수는 각각 다음과 같은 값을 갖는다.

$$k_i = \sqrt{k_o^2 n_i^2 - \beta^2} \quad (i=2, 3, 4) \quad (4a)$$

$$\gamma_i = \sqrt{\beta^2 - k_o^2 n_i^2} \quad (i=1, 5) \quad (4b)$$

그리고 이들 식을 이용하여 전계 $E_x(y)$ 와 이것의 도함수가 각 도파로층의 경계면에서 연속이라는 경계 조건을 적용하여 5층 도파로의 고유치 방정식을 구하여 SCH층의 두께와 조성변화 그리고 활성층의 두께에 따른 횡모드의 고유치를 구하고, 이렇게 계산된 고유치를 이용하여 활성층의 두께가 0.2 μm 이고 SCH의 조성이 1.3 μm InGaAsP인 경우에 SCH층의 두께변화에 따른 각 층에서의 전계의 세기를 그림 5에 나타내었다.

고출력 SLD를 제작하기 위해서는 활성층에 광이 얼마나 잘 가두어지는가를 나타내는 광가둠계수가 중요한데, 이것은 SLD뿐만 아니라 LD의 이론해석에서도 중요한 파라미터가 되며, 횡방향 광가둠계수는 식 (5)와 같이 정의된다.[17]



활성층의 두께, $d_3 = 0.2\mu\text{m}$
SCH층의 조성 = 1.3 μm InGaAsP
그림 5. SCH층의 두께(d_2)변화에 따른 횡모드의 전계 세기
Fig. 5. Field intensity of transverse mode according to SCH thickness(d_2)

$$\Gamma_T = \frac{\int_{-d_3/2}^{d_3/2} |E_x(y)|^2 dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E_x(y)|^2 dy} \quad (5)$$

그림 6에 활성층의 두께와 SCH 두께, 조성에 따른 광가둠계수를 나타내었다. 여기서 활성층의 두께가 두꺼울수록 광가둠계수는 커지지만 반대로 발진임계전류가 커지므로 이를 고려하여 적절한 두께를 선택하여

야 한다. SCH층의 두께가 증가함에 따라 광가둠계수는 어느 두께까지는 커지지만 그 이상의 두께가 되면 오히려 광가둠계수가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러

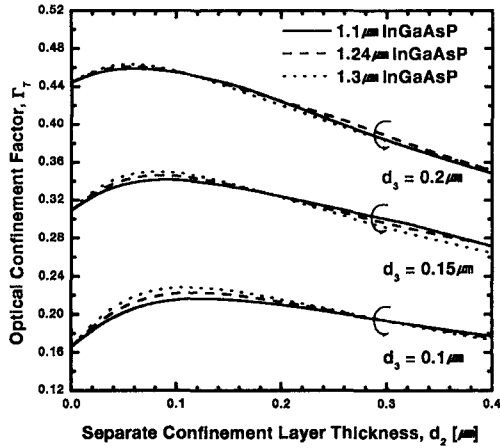


그림 6. 활성층의 두께(d3)와 SCH층의 두께(d2), 구성에 따른 횡방향의 광가둠계수

Fig. 6. Transverse optical confinement factor according to the active layer thickness(d3), SCH thickness(d2), and composition

므로 SCH구조를 이용하여 소자를 제작할 경우에 활성층의 두께에 따른 적절한 SCH층의 두께에 대한 조사가 이루어져야 한다. 예를 들어 활성층의 두께가 0.2 μm인 경우에는 그림 6에서처럼 SCH층의 두께는 0.14 μm이내의 범위에서는 횡방향 광가둠계수가 일반적인 DH(Double Heterostructure)구조에 비하여 크지만 그 이상에서는 횡방향 광가둠계수가 오히려 적다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 활성층을 1.55 μm InGaAsP로 고정하였으며, 두께는 횡방향 단일모드로 동작하도록 하기 위하여 0.2 μm로 고정하였다. 또, SCH층은 제작을 고려하여 1.3 μm InGaAsP를 선택하였으므로 SCH층의 두께에 대한 변화만을 해석하였다. 여기서 1.3 μm InGaAsP가 보다 큰 광가둠계수를 갖는 것 이외에 LPE 성장장치에 의한 성장시 1.24, 1.1 μm InGaAsP에 비하여 보다 우수한 계면 특성을 나타내었기 때문에 SCH층으로 선택되었다.

2.3 측모드 해석

본 논문에서 제안한 SLD의 경우에는 활성층의 상

하 및 좌우에 에너지 갭이 큰 재료로 둘러싸여 캐리어 및 광이 활성층으로 가두어지는 BH(Buried Heterostructure)[18,19]로 되어 있다. 이러한 구조는 활성층의 폭이 캐리어의 확산거리에 비하여 좁을 경우에는 주입 캐리어에 의한 굴절률의 변화의 효과가 작기 때문에 식 (2)의 $\Delta n_{eq}(x)$ 는 무시할 수 있어 측방향 파동 방정식은 다음과 같이 단순화된다.

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + \{k_0^2 n_{eff}^2(x) - \beta_z^2\} E_y(x) = 0 \quad (6)$$

측모드의 해석은 일반적인 BH-LD의 측방향 광가둠계수를 구하기 위한 유효굴절률의 개념을 이용하여 식 (6)의 측방향 파동방정식으로 하였으며, 유효굴절률 n_{eff} 는 식 (7)과 같다.[20]

$$n_{eff} = \sqrt{n_1^2 + \Gamma_T(n_3^2 - n_1^2)} \quad (7)$$

측모드 해석을 위한 3층 도파로의 구조는 측방향 폭이 W인 도파로를 가정하여 그림 7에 나타내었다. 그림의 활성층 영역과 전류 차단층 영역에서 식 (6)으로 주어지는 파동방정식의 해는 다음과 같다.

$$E_{1y}(x) = A_1 \cos(ax) + B_1 \sin(ax) \quad (8a)$$

$$E_{2y}(x) = A_2 \exp(-b(|x| - W/2)) \quad (8b)$$

여기서 각 영역의 전파상수는 다음과 같다.

$$a = \sqrt{k_0^2 n_{eff}^2 - \beta_z^2} \quad (9a)$$

$$b = \sqrt{\beta_z^2 - k_0^2 n_{out}^2} \quad (9b)$$

여기서 n_{eff} 는 활성층 영역의 유효굴절률이고, n_{out} 은 전류 차단층 영역의 굴절률을 나타낸다.

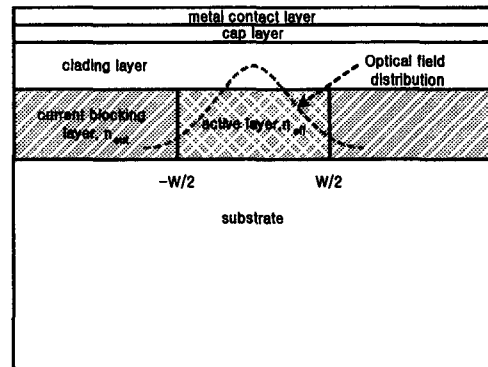
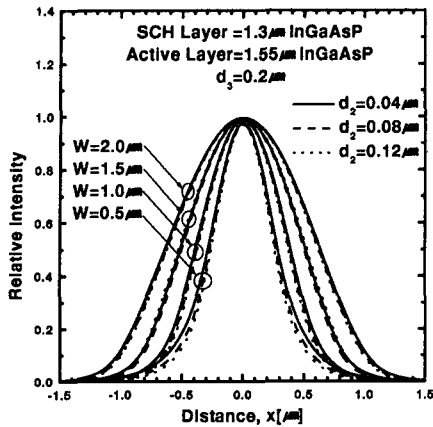


그림 7. 측모드 해석을 위한 평판 도파로

Fig. 7. Slab waveguide for lateral mode analysis



활성층의 두께, $d_3 = 0.2 \mu\text{m}$

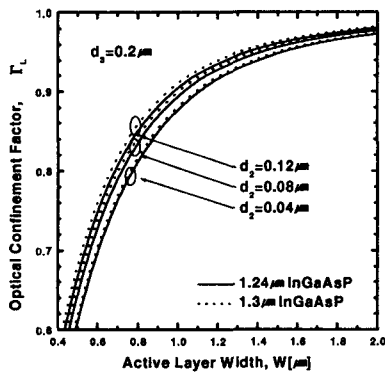
SCH층의 조성 = $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP

그림 8. SCH층 두께(d_2)와 활성층 폭(W)에 따른 측방향 전계 분포.

Fig. 8. Field intensity of lateral mode according to SCH thickness(d_2) and active layer width(W)

전계분포 $E_y(x)$ 와 이것의 도함수를 경계조건을 이용하여 TE 기본 모드의 경우에 대하여 고유치 방정식을 구한 다음, SCH층의 두께와 활성층의 폭에 따른 측모드의 고유치를 계산하고 이를 이용하여 그림 8에 SCH층의 두께에 따른 측방향의 전계 세기를 나타내었다. 그리고 횡모드의 경우와 같이 측모드에서도 식 (10)과 같이 측방향 광가둠계수를 정의할 수 있다.

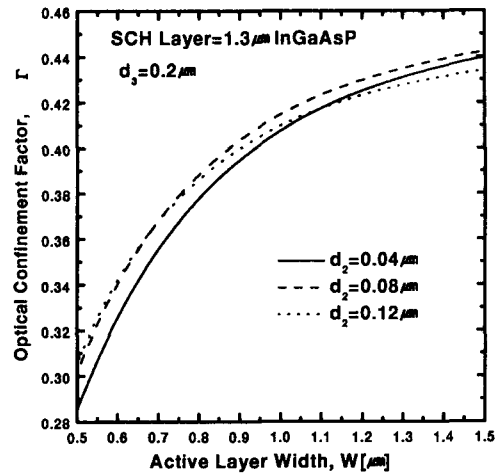
$$\Gamma_L = \frac{\int_{-W/2}^{W/2} |E_y(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E_y(x)|^2 dx} \quad (10)$$



활성층의 두께, $d_3 = 0.2 \mu\text{m}$

그림 9. SCH층 두께(d_2), 조성 그리고 활성층 폭(W)에 따른 측방향 광가둠계수

Fig. 9. Lateral optical confinement factor according to SCH thickness (d_2), composition, and active layer width(W)



활성층의 두께, $d_3 = 0.2 \mu\text{m}$

SCH층의 조성 = $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP

그림 10. SCH층 두께(d_2), 활성층 폭(W)에 따른 총 광가둠계수

Fig. 10. Total optical confinement factor according to SCH thickness (d_2), and active layer width(W)

그림 9에 활성영역의 폭과 SCH층의 두께에 따른 측방향 광가둠계수를 나타내었다. SCH층이 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP인 경우가 $1.24 \mu\text{m}$ InGaAsP에 비하여 측방향 광가둠계수가 큰 것을 알 수 있는데 이는 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP인 경우가 활성층 영역의 유효굴절률이 더 커므로 전류 차단층 영역과의 굴절률 차가 더 커지게 되어 광을 효과적으로 가둘 수 있기 때문에 결과적으로 측방향 광가둠계수가 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 SCH층 두께의 증가에 대해서도 같은 결과를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 그러나 활성영역의 폭이 더욱 증가하게 되면 SCH층의 두께는 측방향 광가둠계수에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

횡모드와 측모드에 대한 결과를 이용하면 소자의 전체 광가둠계수는 식 (11)과 같이 횡방향과 측방향의 광가둠계수의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = \Gamma_T \Gamma_L \quad (11)$$

그러므로 I' 는 2차원적인 활성층 영역에 포함되어 있는 모드에너지의 분율을 나타낸다.

그림 10에서는 SCH층의 조성이 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP일 때, 소자의 전체 광가둠계수를 나타내었다. 이 결과를 보면 전체 광가둠계수는 활성층의 폭이 $0.7\mu\text{m}$ 이하인 경우에는 SCH층의 두께가 $0.12\mu\text{m}$ 인 경우가 광가둠계수가 크고, $0.7\mu\text{m}$ 이상의 폭에서는 $0.08\mu\text{m}$ 인 경우가 광가둠계수가 커다는 것을 알 수 있다. SLD가 단일모드로 동작을 위한 활성층의 폭이 $1.5\mu\text{m}$ 이하인 것을 고려하면 적절한 광가둠계수를 얻기 위한 SCH층의 두께는 $0.08\mu\text{m}$ 가 적당하다는 것을 알 수 있다.

III. SCH-SLD 구조에 따른 반사도

SLD를 제작하는데 있어 매우 중요한 요소 중의 하나는 거울면을 형성하는 출사단면에서의 반사도를 낮추어 반사에 의한 공진기 내부의 발진을 억제하는 것이며, 이를 위하여 여러 가지 방법들이 연구되어 왔다.[21-26]

본 논문에서는 후면에 원도우 영역을 두고, 원도우 영역과 활성층이 만나는 계면에 측방향으로 각도를 가지도록 하는 새로운 구조의 소자를 설계하였다. 모드 해석을 통하여 구하여진 전계분포를 가우시안 빔 근사를 통하여 빔의 spot size를 구하였으며, 이를 이용하여 원도우 구조에 의한 실효 반사도를 원도우영역의 길이의 함수로 구하였다.

활성영역의 도파로에 측방향으로 경사각을 주었을 때의 실효반사도는 2.3절의 측모드 해석을 이용하여 평판 도파로의 기본 TE 모드에서 측방향 경사각에 따라 계산되었다.

3.1 원도우 구조에 의한 실효반사도

InP 원도우 영역은 beam을 퍼뜨려서 반사되어 다시 활성층과 결합되는 빛의 양을 줄여줌으로써 실효 반사도가 낮아지게 한다.

그림 11에 원도우 영역에서 전계의 반사를 나타내었다. 활성영역에서 도파된 전계는 InP로 구성된 원도우 영역으로 방출되어 복사각도를 가지고 전파되고, 단면에서 반사된다. 이렇게 반사된 빛이 다시 활성영역과 결합되는 양은 원도우 영역이 없는 경우의 거울 반사에 비하여 매우 적은 양이 된다.

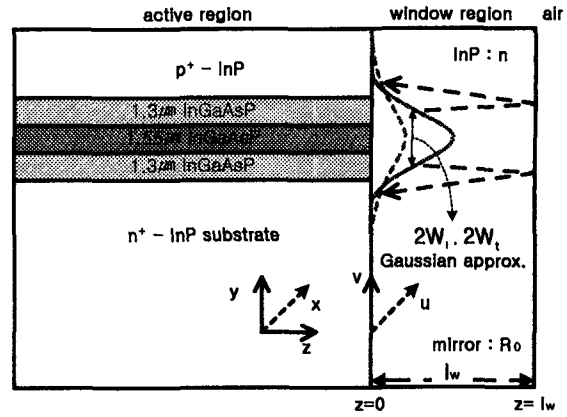


그림 11. 원도우 영역에서의 전계의 반사
Fig. 11. Reflection in the window region

이 경우 구형도파로(rectangular waveguide)에서 도파되는 전계를 가우시안 빔으로 근사하면, 식 (12)와 같다.

$$E_y(u, v, 0) = E_0 \exp\left(-\frac{u^2}{2w_x^2} - \frac{v^2}{2w_y^2}\right) \quad (12)$$

여기서 E_0 는 필드의 최대 진폭이고, w_x 와 w_y 는 각각 측방향 x 와 횡방향 y 의 방향으로 빔의 spot size이고, u 와 v 는 계면에서 각각 x 와 y 의 local axes에 대응한다. 따라서 FFP(far field pattern)은 식 (13)으로 표현된다.[27]

$$E_y^{(x, y, z)} = \sqrt{\frac{jk}{2\pi z}} e^{-jkz} \int_{-\infty}^{\infty} E_y(u, v, 0) \cdot \exp\left[-\frac{jk}{2z}[(x-u)^2 + (y-v)^2]\right] dudv \quad (13)$$

여기서 $k = 2\pi n/\lambda$ 이고, n 은 InP의 굴절률이다. 식 (12)와 식 (13)을 사용하면, $z=0$ 에서 반사되는 전계 분포는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} E_y(x, y, 0) &= \sqrt{R_0} E_y(x, y, l_w) \\ &= \sqrt{R_0} E_0 w_x w_y \sqrt{\frac{jk}{l_w}} e^{-2jkl_w} \\ &\cdot \exp\left[-\frac{jk}{4l_w}(x^2 + y^2)\right] \\ &\cdot \exp\left[-\frac{k^2}{8l_w}(w_x^2 x^2 + w_y^2 y^2)\right] \end{aligned} \quad (14)$$

그리고 직사각형 구조를 가진 도파로에서의 실효반

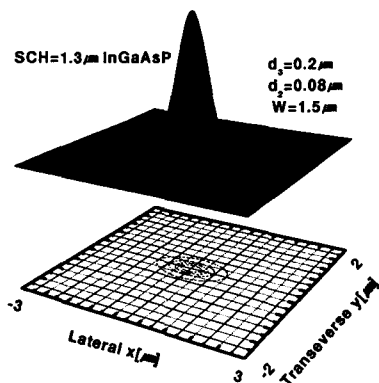
사도는 다음의 식 (15)로 주어진다.[28]

$$R_{eff}(l_w) = R_0 \frac{\sqrt{1 + \frac{4l_w^2}{k^2 w_i^4}}}{\sqrt{\left(1 + \frac{4l_w^2}{k^2 w_i^4}\right)^2 + \frac{4l_w^2}{k^2 w_i^4}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{4l_w^2}{k^2 w_i^4}}}{\sqrt{\left(1 + \frac{4l_w^2}{k^2 w_i^4}\right)^2 + \frac{4l_w^2}{k^2 w_i^4}}} \quad (15)$$

여기서 R_0 는 계면에서의 반사도를 나타내며 코팅을 하지 않았을 경우, 일반적으로 0.3정도로 알려져 있다. 이와 같은 윈도우 구조에 의한 실효 반사도를 구하기 위해서는 II장에서 구한 전계분포를 가우시안 근사를 통하여 전계의 횡방향과 축방향의 빔 spot size를 구하여야 한다. 표 1에 실효 반사도의 계산에 필요한 SCH층의 두께, 조성 그리고 활성층의 폭에 따른 빔의 spot size를 정리하여 나타내었다.

표 1. SCH층의 조성, 두께에 따른 빔의 spot size

W[μ m]	w _i [μ m]			w _i [μ m]		
	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
SCH 1.24 μ m InGaAsP						
0.08	0.304	0.304	0.304	0.486	0.627	0.812
0.12	0.317	0.317	0.317	0.466	0.613	0.801
SCH 1.3 μ m InGaAsP						
0.08	0.305	0.305	0.305	0.476	0.698	0.808
0.12	0.318	0.318	0.318	0.454	0.605	0.841



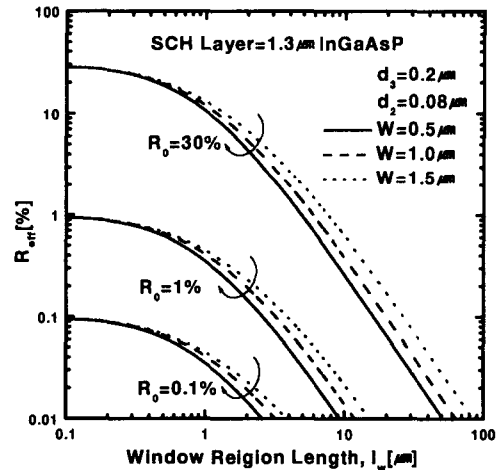
SCH층의 두께 = 0.08 μ m, 활성층의 폭 = 1.5 μ m

SCH층의 조성 = 1.3 μ m InGaAsP

그림 12. 근사화된 가우시안 전계 분포

Fig. 12. Approximated gaussian field distribution

그림 12에는 활성층은 1.55 μ m, SCH층은 조성이 1.3 μ m InGaAsP이고 SCH층의 두께가 0.08 μ m인 경우에 활성층의 폭이 1.5 μ m인 경우에 구한 가우시안 필드분포를 나타내었다. 윈도우 영역의 길이 l_w 에 따른 R_{eff} 의 계산결과가 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 그림 13에는 활성층의 두께가 0.2 μ m이고 SCH층의 조성이 1.3 μ m InGaAsP이고 그 두께가 0.08 μ m인 경우에 활성층의 폭, 윈도우 영역의 길이 그리고 SLD의 단면의 무반사 코팅정도(R_0)에 따른 윈도우 영역의 실효 반사도를 나타내었다. 그림 14의 경우는 SCH의 두께가 0.12 μ m인 경우의 실효 반사도(R_{eff})를 나타내었다.

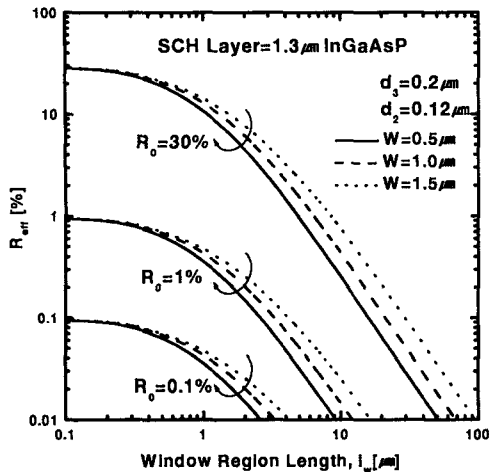


SCH층의 두께(d_2) = 0.08 μ m, 활성층의 두께(d_3) = 0.2 μ m

SCH층의 조성 = 1.3 μ m InGaAsP

그림 13. 윈도우 길이, 활성층 폭 그리고 R_0 에 따른 실효 반사도

Fig. 13. Effective Reflectivity of the window structure as a function of the window length, active layer width, and R_0



SCH층의 두께(d_2) = $0.12\mu\text{m}$, 활성층의 두께(d_3) = $0.2\mu\text{m}$
SCH층의 조성 = $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP

그림 14. 윈도우 길이, 활성층 폭 그리고 R_0 에 따른 실효반사도

Fig. 14 Effective Reflectivity of the window structure as a function of the window length, active layer width, and R_0

윈도우 구조에 의한 실효 반사도는 윈도우 영역의 길이가 증가하고, 활성층의 폭이 감소함에 따라서 실효 반사도가 감소한다. 이는 활성층의 폭을 크게 할수록 측방향 spot size가 증가하므로 실효반사도 역시 증가하는 것이다. 그리고 SCH층의 두께 변화에는 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수가 있다.

예를 들면, 활성영역과 윈도우영역의 계면에서 $R_{eff} \ll 0.01\%$ 반사도를 얻기 위해서는 활성층의 두께가 $0.2\mu\text{m}$, SCH층의 두께가 $0.08\mu\text{m}$ 일 때, 무반사 코팅을 하지 않은 경우에는 윈도우 영역의 길이, l_w 가 $100\mu\text{m}$ 정도가 되어야 한다. 하지만 윈도우 영역이 이렇게 길어질 경우에는 금속 전극층에서의 반사로 인하여 FFP가 공간 단일 모드를 형성하기가 어려워지고 윈도우 영역에서의 흡수가 증가하여 SLD의 출력도 낮아진다. 하지만 무반사 코팅을 1% 했을 때 $10\mu\text{m}$ 정도의 윈도우 영역이면 충분히 낮은 반사도를 얻을 수 있다. 그리고 보다 낮은 0.1%이하의 무반사 코팅을 하였을 경우에는 윈도우 영역의 길이가 $3\mu\text{m}$ 정도면 10-4정도의 반사도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

무반사 코팅을 하지 않을 경우에 10-4정도의 낮은 반사도를 얻기 위한 윈도우 길이는 약 $80\mu\text{m}$ 이상이 되고, 윈도우 영역의 길이가 약 $20\mu\text{m}$ 이상이 되면 빔의

피집에 의하여 금속 전극층에서 반사된 빛 때문에 공간 단일모드의 FFP를 얻기가 어렵다. 따라서 윈도우 영역의 길이는 흡수와 공간 단일모드, 광출력 패턴 그리고 반사도를 고려하여 결정하여야 할 것으로 생각된다.

3.2 측방향 경사각에 따른 실효반사도

앞 절에서 윈도우 영역과 반사도의 관계를 해석하였으며, 이 절에서는 활성영역과 윈도우 영역의 계면에서 측방향 각도와 반사도와와의 관계를 알아보려고 한다. 활성층과 윈도우 영역이 만나는 지점에 측방향으로 각도를 줌으로써 활성층 내부로 다시 반사되어 들어가는 양을 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.[29~31]

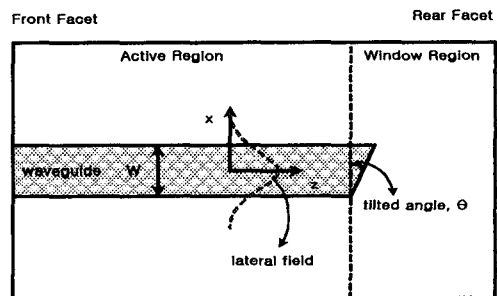


그림 15. 측방향으로 경사진 각을 갖는 평판 도파로 구조
Fig. 15. Slab waveguide structure with laterally tilted angle

그림 15에 측방향으로 경사진 도파로의 구조를 나타내었다. 활성영역 도파로의 끝은 θ 각도로 경사져서 윈도우 영역과 계면을 이루고 있다. 이 경우 계면을 완전한 거울면으로 가정하면 다시 되돌아오는 전계의 반사계수를 구하는 문제는 2θ 로 경사진 평판 도파로에서 경사각에 따른 손실 계산문제와 동가가 된다. 하지만 제작하고자 하는 구조에서는 완전한 거울면이 아니기 때문에 일정한 반사도를 가지게 된다. 이처럼 일정한 반사도를 가지게 될 경우에는 경사 손실에 경사각에 따른 Fresnel 반사손실을 곱하여 주어야 한다. 그러나 Fresnel 반사손실은 평면파에 대해서만이 잘 알려져 있다. 여기서는 기본 TE 모드에 대한 Fresnel 반사손실의 계산에서 평면파에 대한 결과 식을 이용하였다. 이는 오차가 그리 크지 않기 때문에 계산의 번거움을 줄이기 위함이다.

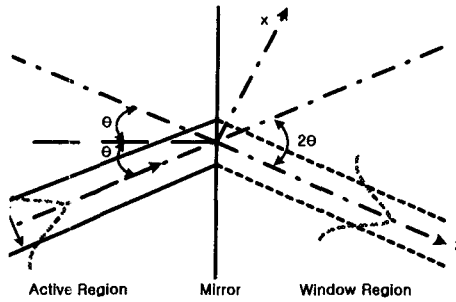


그림 16. 해석을 위한 측방향으로 경사각을 갖는 평판 도파로
Fig. 16. Slab waveguide structure with laterally tilted angle to calculate the reflectivity

해석을 위한 도파로 구조를 그림 16에 나타내었다. 윈도우 영역과의 경계에서 반사되는 필드는 2θ 의 각으로 윈도우 영역으로 도파되는 필드와 등가이다. 그리고 이러한 윈도우 영역으로 도파되는 필드는 활성영역 도파로에서 도파되는 필드에 의하여 발생한다. 만일 두 필드의 위상이 완전히 일치한다면 투과계수는 1이 될 것이다. 하지만 경사각에 의한 손실은 두 필드의 위상면이 일치하지 않기 때문에 발생한다. 이러한 효과는 윈도우 영역으로 입사되는 필드에 위상과 관련된 요소 $e^{2i\theta dx}$ 를 곱해 주어야 설명이 가능한 것으로 알려져 있다.[32] 여기서 β 는 가이드된 TE 모드의 전파상수를 나타낸다. 그리고 x는 측방향 좌표축을 나타낸다. 진폭에 대한 투과계수는 다음의 식으로 주어진다.[33]

$$c = \frac{\beta}{2\omega\mu_0 P_0} \int_{-\infty}^{\infty} |E_y|^2 e^{2i\theta dx} dx \quad (16)$$

여기서 E_y 는 측방향의 기본 TE 모드를 나타내며, ω 는 각 주파수, μ_0 는 진공의 투자율 그리고 P_0 는 도파되는 필드에 의하여 운반되는 광전력을 나타낸다.

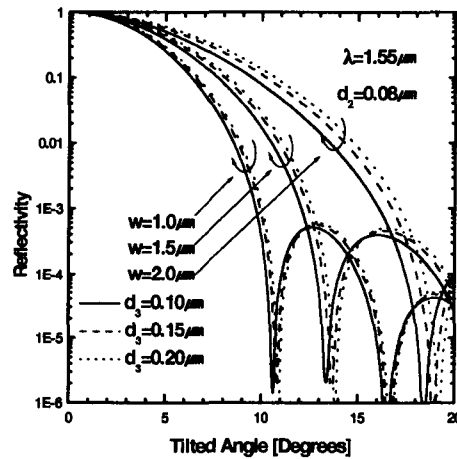
식 (16)을 이용한 광전력에 대한 반사계수는 식 (17)과 같이 표현이 된다.

$$R_g = R_f(\theta) |c|^2 \quad (17)$$

여기서 $R_f(\theta)$ 는 윈도우 영역과 활성영역 도파로 계면의 경사각에 의한 평면파의 Fresnel 반사계수를 나타낸다. $R_f(\theta)$ 는 식 (18)과 같이 표현된다.[34]

$$R_f(\theta) = \frac{(n_{eff} \cos \theta - \sqrt{n_w^2 - n_{eff}^2 \sin^2 \theta})^2}{(n_{eff} \cos \theta + \sqrt{n_w^2 - n_{eff}^2 \sin^2 \theta})^2} \quad (18)$$

여기서 활성영역의 굴절률은 SLD의 유효굴절률 n_{eff} , 윈도우 영역의 굴절률은 n_w 로 InP의 굴절률 값인 3.17을 이용하였다. 그리고 진폭에 대한 투과계수는 식 (16)의 계산에서, E_y 의 표현식은 (8a)식에 의하여 구하여진 값을 이용하여 수치적분을 하였다. 그리고 SCH층의 두께가 $0.08\mu\text{m}$ 이고, 조성이 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP인 경우에 활성층의 두께와 폭 그리고 경사각에 따른 기본 TE모드의 반사도 변화를 그림 17에 나타내었다.



SCH층의 두께(d_3) = $0.08\mu\text{m}$

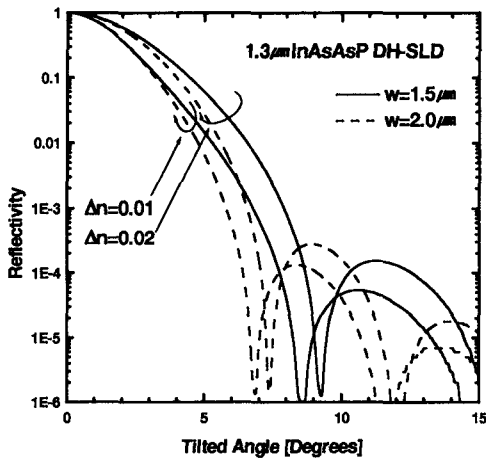
SCH층의 조성 = $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP

그림 17. 활성층 두께, 폭 그리고 경사각에 따른 기본 TE 모드의 반사도

Fig. 17. Fundamental TE mode Reflectivity with tilted angle, active layer thickness, and width

반사도에 영향을 미치는 설계변수를 조사하기 위하여 DH-SLD의 경우에 대하여 윈도우 영역과 활성영역의 굴절률차 $\Delta n(n_{eff} - n_w)$ 과 활성층의 폭의 변화에 따른 기본 TE 모드에 대한 실효반사도 변화를 조사하였다. 그 결과를 그림 18에 나타내었다. 그림 18을 보면 윈도우 영역과 활성영역의 굴절률 차가 작을수록 보다 작은 경사각에서 반사도가 눈에 띄게 줄어

드는 것을 알 수가 있다. 그러므로 활성영역의 유효굴절률이 작을수록 보다 작은 경사각에서 반사도의 감소 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 활성층의 폭을 작게 할수록 같은 경사각에서 반사도가 감소하는 것을 알 수가 있다. 그러므로 설계하고자 하는 SCH-SLD의 활성층의 두께의 증가에 따라서 활성영역의 유효굴절률 n_{eff} 가 증가하고, 활성영역과 윈도우 영역의 굴절률 차가 증가되어 그림 18과 같은 결과가 나타나는 것을 예측할 수가 있다. 또한 SCH층의 두께가 증가함에 따라서도 같은 결과가 나타날 것을 예측할 수가 있다.



활성층의 조성 = 1.3 μ m InGaAsP

그림 18. DH SLD의 경우에 굴절률 차 $\Delta n(n_{eff}-nw)$, 활성층 폭 그리고 경사각에 따른 기본 TE 모드의 반사도

Fig. 18. Fundamental TE mode Reflectivity according to tilted angle, active layer width, and refractive index difference $\Delta n(n_{eff}-nw)$

IV. 해석 결과 및 검토

본 연구에서는 측방향으로 경사진 PBH SCH-SLD의 제작에 앞서 이론해석을 통하여 고효율, 안정된 동작을 얻기 위한 SCH층의 조성과 두께, 그리고 10-4 이하의 반사도를 얻기 위한 윈도우 영역의 길이와 활성영역과 윈도우 영역 계면의 측방향으로 경사진 각도에 대하여 조사를 하였다.

SCH층을 1.3 μ m InGaAsP로 할 경우에 활성층의 폭이 0.7 μ m이하인 경우에는 SCH층의 두께가 0.12 μ m인

경우가 광가득계수가 크고, 0.7 μ m이상의 활성층 폭에서는 SCH의 두께가 0.08 μ m인 경우의 광가득계수가 큰 것을 알 수가 있다. SLD의 단일모드 동작을 위한 활성층의 폭이 1.5 μ m이하인 것을 고려하면 SCH층을 1.3 μ m InGaAsP로 할 경우에 적절한 광가득계수를 얻기 위한 SCH층의 두께는 0.08 μ m가 적당한 것을 알 수가 있었다.

SLD의 반사도를 낮추기 위하여 SLD후면에 윈도우 영역을 만들 경우에 10⁻⁴이하의 반사도를 얻기 위해서는 활성층의 두께가 0.2 μ m, SCH층의 두께가 0.08 μ m 일때, 무반사 코팅을 하지 않은 경우에는 윈도우 영역의 길이, l_w 가 100 μ m 정도가 되어야 한다. 하지만 1% 무반사코팅을 한 경우에는 10 μ m정도면 10⁻⁴정도의 반사도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

활성영역과 윈도우영역 계면의 측방향으로 경사각을 만들어 줄 경우에는 10⁻³이하의 반사도를 얻기 위해서는 활성층 폭이 1 μ m인 경우에는 경사각을 약 10~11o가 적당할 것으로 생각되며, 활성층 폭이 1.5 μ m인 경우에는 경사각을 약 13~14o가 적당한 경사각임을 알 수가 있다.

이상과 같이 결과들을 종합해 볼 때, 효율적이고, 안정된 SLD를 제작하기 위해서는 활성층의 두께를 0.2 μ m, 폭을 1.5 μ m로 하였을 때, SCH층의 조성을 1.3 μ m InGaAsP로 하면 광가득계수를 높게 하기 위해서 두께는 0.08 μ m정도가 적당하다는 것을 알 수가 있었다. 따라서, 윈도우 영역의 길이와 경사각의 적절한 제어를 통하여 무반사 코팅막 없이도 안정된 SLD 제작이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Yasumasa Kashima, Akio Matoba, and Hiroshi Takano, "Performance and Reliability of InGaAsP Superluminescent Diode," J. Lightwave Tech. vol. 10, no. 11, pp. 1644-1649, November, 1992.
- [2] Norman S. K. Kwong and Nadav Bar-Chaim, "High-power superluminescent diode," Appl. Phys. Lett. vol. 54, no. 4, pp. 298-300, January, 1989.
- [3] I. Mito, M. Kitamura, K. Kobayashi, S. Murata,

- K. Seki, Y. Odagiri, H. Nishimoto, M. Yamaguchi, and K. Kobayashi, "InGaAsP Double-Channel-Planar-Buried Heterostructure Laser Diode(DC-PBH LD) with Effective Current Confinement", J. Lightwave Tech. vol. LT-1, no. 1, pp. 195~202, March. 1983.
- [4] 홍창희, 이증기, 조호성, 박경현, 박찬용, 이용탁, "누설전류가 작은 $1.3\mu\text{m}$ GaInAsP/InP 평면매립형 레이저 다이오드" 전자통신지, 제 13권 4호, pp. 2~8, 1992.
- [5] 이증기, 장동훈, 조호성, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 홍창희 "2.5Gbps 광통신용 $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP/InP PBH DFB LD 제작 및 특성" 대한 전자공학지, 제 31권 9호 pp. 139~145, 1994.
- [6] Ho Sung CHO, Dong Hoon JANG, Jung Kee LEE, Kyung Hyun PARK, Jeong Soo KIM, Seung Won LEE, Hong Man KIM and Hyung-Moo PARK, "High-Performance Strain-Compensated Multiple Quantum Well Planar Buried Heterostructure Laser Diodes with Low Leakage Current," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 35, no. 3, pp. 1751~1757, 1996.
- [7] U. Koren, B. I. Miller, Y. K. Su, T. L. Koch, and J. E. Bowers, "Low Internal Loss Separate-Confinement-Heterostructure-InGaAs/InGaAsP-Quantum-Well-Lasers", Appl. Phys. Lett., Vol. 51, pp. 1744~1746, 1987.
- [8] S. R. Chinn, P. S. Zory, and A. R. Reisinger, "A Model for GRIN-SCH-SQW Diode Lasers", IEEE. J. Quantum Electron., Vol. 24, No. 11, pp. 2191~2214, 1988.
- [9] M. Kitamura, S. Takano, T. Sasaki, H. Yamada, and I. Mito, "High Power Operation in InGaAs Separate-Confinement-Heterostructure-Quantum-Well-Lasers", Appl. Phys. Lett., Vol. 53, pp. 1~3, 1988.
- [10] R. W. Glew, B. Garrett, and P. D. Greene, "Very Low Threshold Current Density SCH-MQW Laser Diodes Emitting at $1.55\mu\text{m}$ ", Electron. Lett., Vol. 25, pp. 1103~1104, 1989.
- [11] M. Rosenzweig, M. Mohrle, H. Duser, and H. Venghaus, "Threshold-Current Analysis of InGaAs/InGaAsP Multiquantum Well Separate-Confinement Lasers", IEEE. J. Quantum Electron., Vol. 27, No. 6, pp.1804~1811, 1991.
- [12] K. Utaka, Y. Suematu, K. Kobayashi and H. Kawanishi, "GaInAsP/InP Integrated Twin-Guide Lasers with First-order Distributed Bragg Reflectors at $1.3\mu\text{m}$ Wavelength", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 19, pp. L137~L140, 1980.
- [13] D. Botez, "InGaAsP/InP Double-Heterostructure Lasers: Simple Expressions for Wave Confinement, Beamwidth and Threshold Current over Wide Ranges in Wavelength ($1.1\sim 1.65\mu\text{m}$)", IEEE. J. Quantum Electron., QE-17, pp. 178~186, 1981.
- [14] D. Botez, "Effective Reflective Index and First Order Mode Cut-Off Condition in InGaAsP/InP DH Laser Structure($\lambda=1.2\sim 1.6\mu\text{m}$)", IEEE. J. Quantum Electron., QE-18, pp. 865~870, 1982.
- [15] Govind P. Agrawal and Niloy K. Dutta, "Semiconductor Lasers", 2nd Ed., pp. 41~55, 1993.
- [16] 하홍준, 오수환, 이석정, 박윤희, 오종환, 홍창희, "InGaAsP/InP RWG MQW-LD의 최적설계", 한국광학회지 제 7권 4호, pp. 375~381, 1996.
- [17] D. Botez, "Analytical Approximation of the Radiation Confinement Factor for the TE₀ Mode of a Double Heterostructure Laser", IEEE. J. Quantum Electron., QE-14, pp. 330~332, April, 1978.
- [18] T. Tsukada, "GaAs - GaAlAs Buried-Heterostructure Injection Lasers," J. Appl. Phys., Vol. 45, pp. 4899~4906, 1974.
- [19] J. J. Hsieh and C. C. Shen, "Room-Temperature CW Operation of Buried Stripe Double Heterostructure GaInAsP/InP Diode Lasers," Appl. Phys. Lett., Vol. 30, pp. 429~431, 1977.
- [20] K. Hayata, M. Koshihara, and M. Suzuki, "Lateral Mode Analysis of Buried Heterostructure Diode Lasers by the Finite-Element-Method", IEEE J. Quantum Electron., QE-22, No. 6, pp. 781~786,

- 1986.
- [21] G. A. Alphones, D. B. Gibert, M. G. Harvey, and M. Ettenberg, "High-Power Superluminescent Diodes", *IEEE J. Quantum Electron.* QE-24, No. 12, pp. 2454~2457, December, 1988.
- [22] C. F. Lin, "Superluminescent Diodes with Angled Facet Etched by Chemically assisted Ion Beam Etching", *Elect. Lett.*, Vol. 27, pp. 968~970, 1991.
- [23] I. P. Kaminow, G. Eisenstein, and L. W. Stulz, "Measurement of the Reflectivity of an Antireflection Coating on a Superluminescent Diode", *IEEE J. Quantum Electron.* QE-19, pp.493~495, 1983.
- [24] N. S. K. Kwong, K. Y. Lay, N. Bar-Chaim, I. Ury, and K. J. Lee, "High Power, High Efficiency Window Buried Heterostructure GaAsAl Superluminescent Diode with an Integrated Absorber", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 51, pp. 1879~1881, 1987.
- [25] K. Tateoka, H. Naito, M. Yuri, M. Kume, K. Hamada, H. Shimizu, M. Kazumura, and I. Teramoto, "A High-Power GaAlAs Superluminescent Diode with an Antireflective Window Structure", *IEEE J. Quantum Electron.* QE-27, No. 6, pp. 1568~1773, 1991.
- [26] H. Nagai, Y. Noguchi, and S. Sudo, "High-Power, High-Efficiency 1.3 μ m Superluminescent Diode with a Buried Bent Absorbing Guide Structure", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 54, No. 18, 1719~1721, January, 1989.
- [27] X. Zeng, C. Liang, and Y. An, "Far-field Radiation of Planar Gaussian Source and Composition with Solutions Based on The Parabolic Approximation", *Applied Optics*, Vol. 36, No. 10, pp. 2042~2047, April, 1997.
- [28] K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai and Y. Matsushima, "Effect of Mirror Facets on Lasing Characters of Distributed Feedback InGaAsP/InP Laser Diodes at 1.5 μ m Range," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-20, pp. 236~245, 1984.
- [29] D. R. Scifres, W. Streifer, and R. D. Burnham, "GaAs/GaAsAl Diode Lasers with Angled Pumping Stripes", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-14, pp. 223~227, 1987.
- [30] J. Salzman, R. Lang, S. Margalit, and A. Yariv, "Tilted Mirror Semiconductor Laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 47, pp. 9~11, 1985.
- [31] C. A. Hill and D. R. Hall, "Waveguide Laser Resonator with a Tilted Mirror", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-22, pp. 1078~1087, 1986.
- [32] D. Marcuse, "Reflection Loss of Laser Mode from Tilted End Mirror". *J. Lightwave Tech.*, vol. 7, no. 2, pp. 336~339, 1989.
- [33] L. N. Kurbatov, S. S. Shakhidzhanov, L. V. Bystrova, V. V. Kr- apukhin, and S. I. Kolonenkova, "Investigation of Superluminescence Emitted by a Gallium Arsenide", *Sov. Phys. Semicon.*, vol. 4, pp.1739~1744, 1971.
- [34] D. Marcuse, "Light Transmission Optics", *Bell Laboratories Series*, New York: Van Nostrand Reinholds, pp. 22, 1972.



홍창희(Tchang-Hee Hong)

1969 한국해양대학교(공학사-항해학)
 1974 부산대학교(이학사-물리학)
 1977 동경공업대(공학석사-전자공학)
 1981 동경공업대(공학박사-전자물리)
 1972-1979 한국해양대학교 전임강사
 1979-1983 한국해양대학교 조교수
 1982-1983 서울대학교 객원교수
 1983-1988 한국해양대학교 부교수
 1988-현재 한국해양대학교 교수



황상구(Sang-Ku Hwang)

1962년 10월 30일생
 1985-1990 동아대학교 전자공학과
 공학사
 1990-1992 한국해양대학교 전자통
 신공학과 공학석사
 1997-현재 한국해양대학교 전자통
 신공학과 박사과정
 주관심분야: 반도체레이저, 반도체 광증폭기



김정호(Jeong-Ho Kim)

1993-1998 한국해양대학교 전자통신공학과 공학사

1998-2000 한국해양대학교 전자통신공학과 공학석사

2000-2001.2 (주) 사라콤 인턴연구원

2001- 현재 한국해양대학교 전자통신공학과 박사과정
주관심분야: 반도체레이저,반도체 광증폭기, SLD



김운섭(Weoun-Seub Kim)

1991-1999 한국해양대학교 전자통신공학과 공학사

1999-현재 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정

주관심분야: 통신용 광소자, 광집적소자



김동욱(Tong-Wook Kim)

1991-1998 한국해양대학교 전자통신공학과 공학사

1998-현재 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정

주관심분야: 반도체레이저, SOA, SLD



안세경(Se-Kyung An)

1990-1994 한국해양대학교 전자통신공학과 공학사

1994-1997 한국해양대학교 전자통신공학과 공학석사

2001-현재 한국해양대학교 전자통신공학과 박사과정

주관심분야: 반도체레이저,반도체 광증폭기, SLD