The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 9, No. 5, pp.498-505,1996.

# 고출력 Laser Diode 를 위한 AR, HR Coating Simulation 에 관한 연구

논 문
9-5-10

# A Study on AR, HR Coating Simulations for the High Power Laser Diode

류정선*, 윤영섭*
(Jeong-Seon Ryoo , Yung-Sup Yoon)

**Abstract**

In the present work, we have developed the simulator to optimize the process conditions of the AR(antireflection) and HR(high-reflection) coatings for the high power laser diode. The simulator can run on the PC. After making the simple optical model, we establish the Maxwell equations for the model by the operator conversion. By using the Mathematica, we derive a matrix for the multilayer system by applying the equations to the model and optimize the AR and HR coating process conditions by obtaining the reflection rate from the matrix. We also prove the validity of the simulator by comparing the simulation with the characteristics of the laser diode which is AR and HR coated according to the optimized conditions.

**Key Words (중요용어)** : LD (레이저 다이오드), Reflectance (반사율), Transmittance (투과율), Quantum Efficiency (양자효율)

## 1. 서 론

반도체 laser diode (LD) 는 초경량 소형이며 효율이 매우 좋기 때문에 광통신, 광정보 처리 및 광계산 등 광을 이용한 응용 연구에 가장 많이 사용되는 능동 소자이며, 또한 그 응용 영역이 비약적으로 확장되어지고 있다. 이제 반도체 laser 기술의 초점은 크게 두 가지 방향에 맞추어지고 있다. 첫째는 광통신의 정보 수용 능력 증대가 요구됨에 따라 파장선폭이 작고 안정동작을 하는 laser 의 개발에 초점이 맞추어지고 있고, 둘째는 장거리 광통신, 광학적 disk driver, compact disk player, CD-ROM, video disk player 등에 쓰이는 LD 에 요구되는 고출력 또한 그에 못지 않게 관심이 집중되고 있다.[1] 광통신에서 고출력의 명백한 이점은 중계기 간격을 늘리므로서 중계기수를 줄일 수 있을 뿐만아니라, receiver 에서 신호와 잡음의 비를 늘릴 수 있다는 것이다. 또한 고출력 반도체 laser 는 다른 분야에서도 많이 사용되고 있는데, bar code scanning, laser printer, 또는 Nd$^{3+}$:YAG 같은 laser 및 광섬유 증폭기용 optical pump source 같은 것들이 그 대표적인 예이다. 고출력 LD 를 만들기 위해 많은 기술들이 도입되었고, 그에 따라서 channelled substrate planar (CSP), constricted double heterostructure (CDH), buried V-channelled substrate inner stripe (B-VSIS), 그리고 buried twin-ridge substrate (BTRS) laser 같은 고출력 LD 들이 개발되었다.[2,3] LD 가 고출력화되면서 문제가 되는 것은 mirror 부분에서 발생하는 열에 의해 facet 면이 파괴되는 reliability 의 저하이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 laser 의 한쪽 mirror 면은 anti-reflection (AR) coating 을 하고 다른 쪽 mirror 면은 high-reflection (HR) coating 을 하는 방법이 매우 유효하다. 이렇게 함으로써 facet 영역에서 광의 흡수를 방지하여 열의 발생을 저하시켜 facet 면이 파괴되는 것을 막을 수 있다.[4] 또한 LD 는 기본적으로 광증폭기에 positive feedback 구조를 가지는 소자이므로 LD facet 면의 반사율을 조정함으로서 LD 의 응용 범위를 진행파형 (TW) LD 증폭기, external cavity LD, LD 를 이용한 mode locking, superluminescence LD, 광정보 저장에 사용되는

* : 인하대학교 전자재료공학과
접수일자 : 1996년 2월 29일
심사완료 : 1996년 5월 6일

laser head (optical switched laser head) 등으로 비약적으로 확장시킬 수 있다.[5,6,7] 그러므로 고출력 laser diode 에서 facet 면의 반사율을 조절할 수 있는 공정 조건을 찾기 위한 simulation 은 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 고출력 LD 를 위한 HR, AR coating 공정 조건의 확립을 위한 simulation 에 대해 연구하였다.

## 2. Modeling

굴절률 $n_1$, 두께 l 인 유전막을 $Al_xGa_{1-x}As$ (굴절률 $n_T$) 가 활성층인 LD 의 mirror 면에 증착한 경우를 고찰하자 (그림 1).

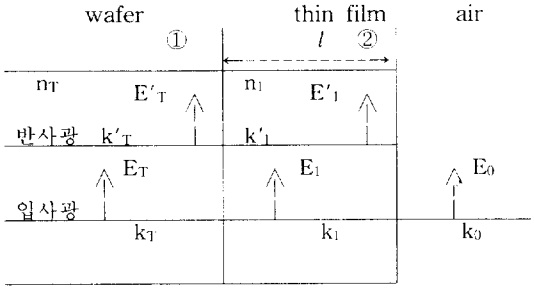



**그림 1.** Wafer-thin film-air 구조의 개략도

**Fig. 1.** Schematic diagram of the wafer-thin film-air structure.

여기서 활성층에서 만들어진 광이 mirror 에 수직입사하고 각 영역은 isotropic, nonconducting 매질이라 하고 입사광을 평면파라 가정할 때, ①, ② 경계면에서 (1a)~(1e) 의 5개 wave vector가 얻어진다.

$$\overrightarrow{E_T} = \vec{i}\, E_T e^{i(k_T \cdot r - \omega t)} \tag{1a}$$

$$\overrightarrow{E'_T} = \vec{i}\, E'_T e^{-i(k_T \cdot r + \omega t)} \tag{1b}$$

$$\overrightarrow{E_1} = \vec{i}\, E_1 e^{i(k_1 \cdot r - \omega t)} \tag{1c}$$

$$\overrightarrow{E'_1} = \vec{i}\, E'_1 e^{-i(k_1 \cdot r + \omega t)} \tag{1d}$$

$$\overrightarrow{E_0} = \vec{i}\, E_0 e^{i(k_0 \cdot r - \omega t)} \tag{1e}$$

평면파의 파동 방정식은 $e^{i(k \cdot r - \omega t)}$ 이므로, (2a), (2b) 와 같은 operator 변환을 할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} = -i\omega \tag{2a}$$

$$\nabla = i\vec{k} \tag{2b}$$

이 operator 변환을 통한 Maxwell 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{k} \times \vec{E} &= \mu\, \omega \vec{H} \\ \vec{k} \times \vec{H} &= -\varepsilon\, \omega \vec{E} \\ \vec{k} \cdot \vec{E} &= 0 \\ \vec{k} \cdot \vec{H} &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $\mu$, $\varepsilon$ 는 각각 매질의 permeability와 permittivity이다.

식 (3)으로부터,

$$\vec{B} = \frac{n}{c}\, \vec{u} \times \vec{E} \tag{4}$$

단, $n = \sqrt{\varepsilon_r}$, c = 광속, $\vec{u}$ 는 단위 vector 임을 알 수 있다.

TE mode에 대하여 ①, ② 경계면에서의 연속 경계조건과 식 (4) 를 사용하면 ①의 경계면에서는 식 (5), (6) 이 구해진다.

$$E_T + E'_T = E_1 + E'_1 \tag{5}$$

$$n_T E_T - n_T E'_T = n_1 E_1 - n_1 E'_1 \tag{6}$$

같은 방법으로 ② 경계면에서 유전막에 의한 위상차를 고려하면 식 (7), (8) 이 구해진다.

$$E_1 e^{ik_1 l} + E'_1 e^{ik_1 l} = E_0 \tag{7}$$

$$n_1 E_1 e^{ik_1 l} - n_1 E'_1 e^{ik_1 l} = n_0 E_0 \tag{8}$$

(5), (6) 과 (7), (8) 을 행렬로 구성하면, 각각 식 (9), (10) 과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ n_T \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -n_T \end{pmatrix} r = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ n_1 & -n_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ E' \end{pmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{pmatrix} e^{ik_1 l} & e^{-ik_1 l} \\ n_1 e^{ik_1 l} & -n_1 e^{-ik_1 l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ n_0 \end{pmatrix} t \tag{10}$$

단, $r = \left(\frac{E'_T}{E_T}\right)$, $t = \left(\frac{E_0}{E_T}\right)$

$E = \left(\frac{E_1}{E_T}\right)$, $E' = \left(\frac{E'_1}{E_T}\right)$

식 (9), (10) 을 이용하면 식 (11) 이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ n_T \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -n_T \end{pmatrix} r = M \begin{pmatrix} 1 \\ n_0 \end{pmatrix} t \tag{11}$$

단, $M = \begin{pmatrix} \cos k_1 l & \frac{-i}{n_1} \sin k_1 l \\ -i n_1 \sin k_1 l & \cos k_1 l \end{pmatrix}$

굴절률이 $n_1$, $n_2$, $n_3$,…,$n_N$ 이고, 두께가 $l_1$, $l_2$, $l_3$, …,$l_N$ 인 N개의 dielectric film 을 coating 했다고 하면, 같은 방법으로 식 (12) 가 얻어진다.

$$\begin{pmatrix}1\\ n_T\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}1\\ -n_T\end{pmatrix}r=M_1M_2\cdots M_N\begin{pmatrix}1\\ n_0\end{pmatrix}t=M\begin{pmatrix}1\\ n_0\end{pmatrix}t \tag{12}$$

여기서, $M=M_1M_2M_3\cdots M_N$ 라 하고,

$M=\begin{pmatrix}A & B\\ C & D\end{pmatrix}$ 로 놓으면,

r 과 t 는 각각 (13), (14) 와 같이 된다.[8]

$$r=\frac{An_T+Bn_Tn_0-C-Dn_0}{An_T+Bn_Tn_0+C+Dn_0} \tag{13}$$

$$t=\frac{2n_T}{An_T+Bn_Tn_0+C+Dn_0} \tag{14}$$

여기에서 반사율 (Reflectance) 과 투과율 (Transmittance) 은 각각 $R=|r|^2$, $T=\frac{n_t}{n_i}|t|^2$ 으로 정의되므로, 각층의 굴절률, 두께 그리고 층의 수를 알면 반사율 R 을 계산할 수 있다.[9]

## 3. AR, HR coating 이 external quantum efficiency, threshold current density 에 미치는 영향

LD 의 front facet 에서의 external quantum efficiency $\eta_{ext,f}$ 와 threshold current density 는 각각 식 (15), (16) 와 같이 구해진다[4].

$$\eta_{ext,f}=\frac{1}{1+\frac{1-R_r}{1-R_f}\sqrt{R_f/R_r}}\cdot\frac{\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_rR_f}\right)}{\alpha+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_rR_f}\right)}\cdot\eta_{int} \tag{15}$$

$$J_{th}=\frac{I_{th}}{LW}=\frac{d}{\eta_{int}}\left\{J_0+\frac{1}{\beta\Gamma}\left(\alpha+\frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_rR_f}\right)\right\} \tag{16}$$

여기서 L : cavity length, W : stripe width, d : active layer thickness, $\eta_{int}$ : internal quantum efficiency, $J_0$ : constant, $\beta$ : constant, $\Gamma$ : confinement factor, $J_{th}$ : threshold current density, $R_f$ : reflectance of the front facet, $R_r$ : reflectance of the rear facet 을 나타낸다.

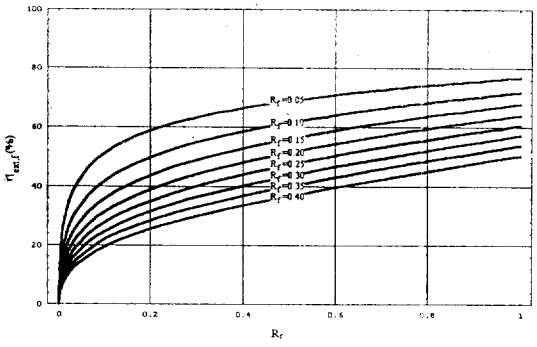



**그림 2.** External quantum efficiency 와 반사율 $R_f$, $R_r$ 간의 관계

**Fig. 2.** Relationship of the external quantum efficiency and the reflectances, $R_f$ and $R_r$.

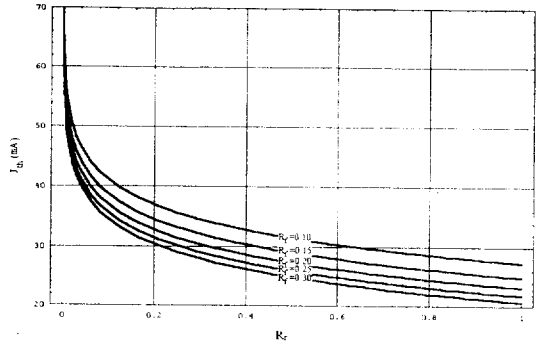



**그림 3.** Threshold current 와 반사율 $R_f$, $R_r$ 간의 관계

**Fig. 3.** Relationship of the threshold current and the reflectances, $R_f$, $R_r$.

L=300$\mu$m, W=4$\mu$m, d=0.15$\mu$m, $\eta_{int}$=1, $J_0$=4500A/cm$^2$·$\mu$m, $\beta$=0.025cm·$\mu$m/A, $\alpha$=15cm$^{-1}$, $\Gamma$=0.2 인 경우에, 양쪽 mirror 면의 반사율인 $R_f$ 와 $R_r$ 에 따른 external quantum efficiency, $\eta_{ext,f}$ 와 threshold current density, $J_{th}$ 를 각각 그림 2, 3 에 나타내었다.

그림 2, 3 에서 $R_f$ 가 작아지고 $R_r$ 이 커지면 $\eta_{ext,f}$ 가 증가하며 동일한 값의 $R_r$ 에 대하여 $R_f$ 가 작을수록 $\eta_{ext,f}$ 가 증가하고 문턱 전류도 증가함을 알 수 있다. Coating 하지 않은 bare mirror 의 반사율이 30% 정도임을 감안할 때, $R_f$~10%, $R_r$~90% 로 할 경우 $\eta_{ext}$ 가 36% 에서 70% 로 2 배 정도 증가함을 알 수 있다.

출력 $P_{out}$ 은

$$P_{out}=\eta_{ext}(I-I_{th}),\qquad (I>I_{th}) \tag{17}$$

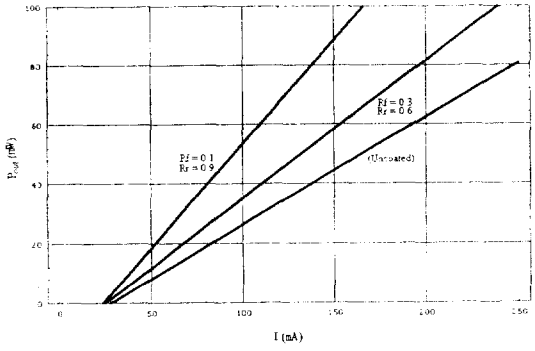



**그림 4.** Coating 하지 않은 경우($R_f$ = $R_r$ = 0.3)와, coating 한 경우 중 $R_f$ = 0.3, $R_r$ = 0.6 일 경우와 $R_f$ = 0.1, $R_r$ = 0.9 일 경우 $P_{out}$ 과 I 의 관계

**Fig. 4.** Relationships of $P_{out}$ and I for the non-coating($R_f$ = $R_r$ = 0.3) and coating ($R_f$ = 0.3, $R_r$ = 0.6 and $R_f$ = 0.1, $R_r$ = 0.9) cases.

이므로 전류 I 와 출력 $P_{out}$ 의 관계를 구해보면 그림 4 와 같이 나타난다. $R_f$ = 0.1, $R_r$ = 0.9 로 한 경우, coating 하지 않은 경우 ($R_f$ = $R_r$ = 0.3) 보다 출력은 1.92배 정도 향상됨을 알 수 있다.

## 4. Simulation 의 응용

### 4.1. Coating Material 의 선정

HR, AR coating 의 효과를 얻기 위해서는 2개의 굴절률이 다른 일정한 두께의 유전막을 반복 배열하면 되며, 이에는 film 의 접착성이 뛰어난 $SiO_2$/$Si_3N_4$ 계와 $Al_2O_3$/amorphous Si 계가 널리 쓰이고 있다.[10] 두가지 물질계에 대한 입사광의 파장 변화에 따른 반사율을 구하였다. 우선, $SiO_2$/$Si_3N_4$ 계의 경우, 입사광 $\lambda$=8300 Å 에 대하여 각 film 을 각각 $\lambda$/4n의 두께로 고정시킨다. 이때 각 물질의 굴절률은 $Si_3N_4$는 n=2.0, $SiO_2$는 n=1.47이다. Film 을 wafer-$Si_3N_4$-$SiO_2$ 의 순서와 wafer-$SiO_2$-$Si_3N_4$ 의 순서로 배열한 6개층과 8개층에 대해서 각각 입사광의 파장에 따른 과 반사율을 그림 5에 나타내었다. 같은 방법으로 $Al_2O_3$(n=1.76), Si(n=3.48) 을 배열한 1, 3, 4, 5 개층에 대하여 파장에 따른 반사율을 그림 6에 나타내었다.

그림 5 와 그림 6 을 비교하면 출력파장 8300 Å 주위에서 $Al_2O_3$/a Si 계 coating 의 결과가 $SiO_2$/$Si_3N_4$ 계 coating 의 결과보다 더 넓은 영역에서 더 큰 반사율을 보이고 있다. 이는 $Al_2O_3$ 와 Si 의 굴절률비가 $Si_3N_4$ 와 $SiO_2$ 의 굴절률비보다 크기 때문이다. 한편, $Al_2O_3$ 1개층의 대한 반사율은 8300 Å 의 부근에서 저 반사율을 나타낸다. 따라서 HR coating 의 재료로는 $Al_2O_3$/a-Si 계가 $SiO_2$/$Si_3N_4$ 계보다 효과적인 재료가 되며, AR coating 의 재료로는 $Al_2O_3$ 1개층이 적합함을 알 수 있다.

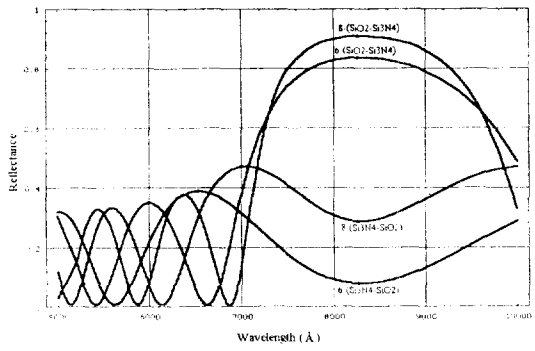



**그림 5.** $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 각층 두께가 $\lambda$/4n 으로 고정된 $Si_3N_4$ 와 $SiO_2$ 를 배열했을 때 ($\lambda$=8300 Å) 파장에 따른 반사율 (6, 8개층)

**Fig. 5.** Reflectance as a function of wavelength for the alternating layers of $Si_3N_4$ and $SiO_2$ on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (6, 8 layers, thickness of each layer fixed at $\lambda$/4n ($\lambda$=8300 Å))

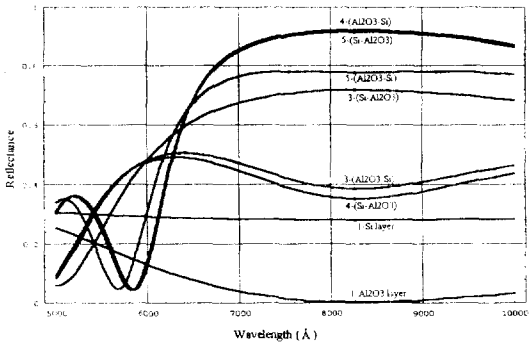



**그림 6.** $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 각층 두께가 $\lambda$/4n 으로 고정된 $Al_2O_3$ 와 Si 를 배열했을 때 ($\lambda$=8300 Å) 파장에 따른 반사율

**Fig. 6.** Reflectance as a function of wavelength for the alternating layers of $Al_2O_3$ and Si on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ ( thickness of each layer fixed at $\lambda$/4n($\lambda$=8300 Å) )

### 4.2. Film 막의 구성

#### 4.2.1. HR coating

그림 6 에서 HR coating 효과를 얻기 위해서는 film 을 다층으로 형성하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 그림 7 에서 그림 12 까지 $Al_2O_3$/a-Si 계에 대하여 film 을 다층으로 형성한 coating 결과가 나타나 있다. 이는 반복되는 $Al_2O_3$ 와 Si 의 두 film 중 한 film 의 두께를 $\lambda/4n$ 로 고정하고, 다른 film 의 두께 변화에 대한 반사율을 구한 것이다. 여기서 wafer-$Al_2O_3$-Si 의 순서로 배열할 경우, 짝수층을 형성할 때 홀수층을 형성했을 때보다

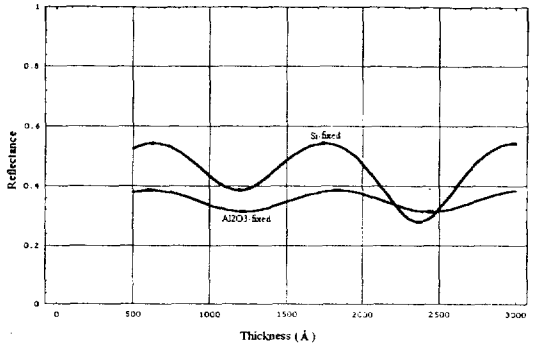



**그림 7.** $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 $Al_2O_3$와 Si 순서로 배열된 3개층의 두께에 따른 반사율 (고정막 두께 = $\lambda/4n$)

**Fig. 7.** Reflectance as a function of thickness for alternating 3 layers of $Al_2O_3$ and Si on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (thickness fixed at $\lambda/4n(\lambda=8300\text{Å})$)

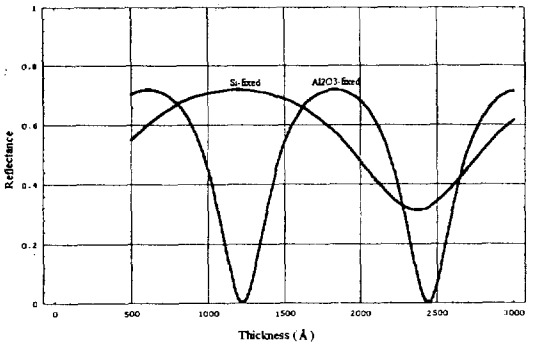



**그림 8.** $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 Si 와 $Al_2O_3$ 순서로 배열된 3개층의 두께에 따른 반사율 (고정막 두께 = $\lambda/4n$)

**Fig. 8.** Reflectance as a function of thickness for alternating 3 layers of Si and $Al_2O_3$ on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (thickness fixed at $\lambda/4n(\lambda=8300\text{Å})$)

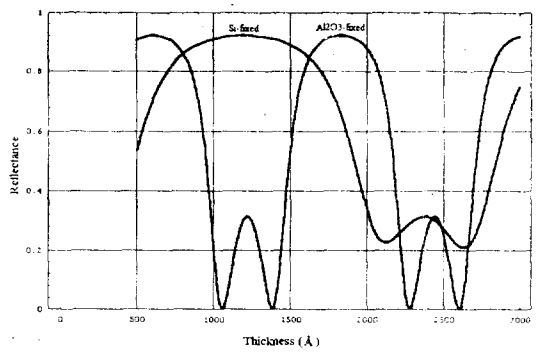



**그림 9.** $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 $Al_2O_3$ 와 Si 순서로 배열된 4개층의 두께에 따른 반사율 (고정막 두께 = $\lambda/4n$)

**Fig. 9.** Reflectance as a function of thickness for alternating 4 layers of $Al_2O_3$ and Si on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (thickness fixed at $\lambda/4n(\lambda=8300\text{Å})$)

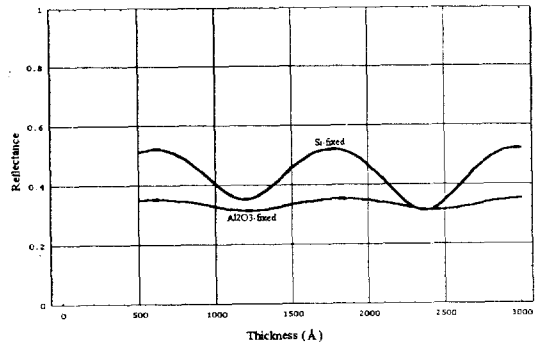



**그림 10.** $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 Si 와 $Al_2O_3$ 순서로 배열된 4개층의 두께에 따른 반사율 (고정막 두께 = $\lambda/4n$)

**Fig. 10.** Reflectance as a function of thickness for alternating 4 layers of Si and $Al_2O_3$ on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (thickness fixed at $\lambda/4n(\lambda=8300\text{Å})$)

더 큰 반사율을 얻을 수 있고, wafer-Si-$Al_2O_3$ 의 순서로 배열할 경우는 홀수층을 형성할 때 짝수층을 형성할 때보다 더 큰 반사율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 Si 의 굴절률과 substrate 인 $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 의 굴절률(n=3.55)이 비슷하므로 wafer-$Al_2O_3$-Si 의 순서로 N개층을 만들었을 때의 분포가 wafer-Si-$Al_2O_3$ 의 순서로 (N+1)개층을 배열했을 때와 비슷한 특성을 가지기 때문이다(그림 7와 그림10, 그림 9과 그림 12 비교). 결론적으로, 고출력 LD 출력 특성을 우수하게 하는 HR

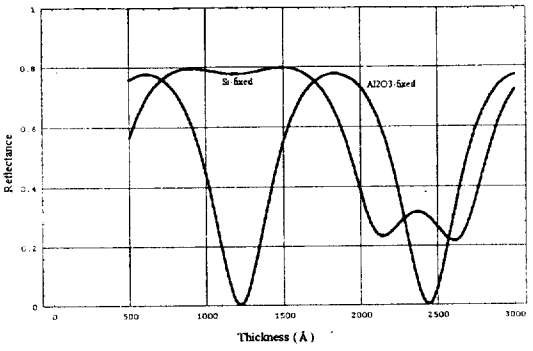



그림 11. $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 $Al_2O_3$ 와 Si 순서로 배열된 5개층의 두께에 따른 반사율 (고정막 두께 = $\lambda/4n$)

Fig. 11. Reflectance as a function of thickness for alternating 5 layers of $Al_2O_3$ and Si on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (thickness fixed at $\lambda/4n(\lambda=8300Å)$)

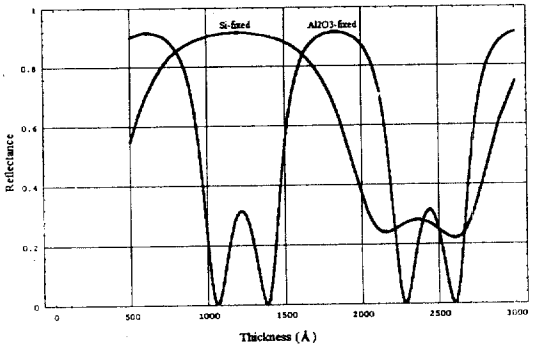



그림 12. $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 Si 와 $Al_2O_3$ 순서로 배열된 5개층의 두께에 따른 반사율 (고정막 두께 = $\lambda/4n$)

Fig. 12. Reflectance as a function of thickness for alternating 5 layers of Si and $Al_2O_3$ on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ (thickness fixed at $\lambda/4n(\lambda=8300Å)$)

coating 의 반사율은 90% 정도이므로, 이 정도의 반사율에서 적은 층수로 넓은 두께 margin 을 보이는 배열은 wafer-$Al_2O_3$-Si 의 순서로 4개층을 coating 한 것임을 알 수 있다.

### 4.2.2. AR Coating

이미 그림 6 에서 $Al_2O_3$ 1개층만 coating 하더라도 적절한 AR coating 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 13, 그림 14에 wafer 에 $Al_2O_3$ 1개층을 입혔을 때와 Si 1개층을 입혔을 때 각 film 의 두께 변화에 따른 반사율을 나타내었다. 그림 13에서 $Al_2O_3$ 1개층이 넓은 두께 영역에서 저 반사율을 보이고 있다. 또한 $Al_2O_3$ 는 경도가 크고 GaAs wafer 와의 접착력이 뛰어나므로 AR coating 용 film 으로 적합하다.

한편 그림 14 에서 a-Si 1개층을 coating 할 경우, 두께 변화에 대한 반사율의 변화가 거의 없으며 무 coating 때와 반사율이 거의 같으므로 mirror 보호막으로서는 우수한 재료가 될 수 있음을 보여준다. 이는 앞서 설명하였듯이 Si 의 굴절률(n = 3.48)이 $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 의 굴절률(n = 3.56)과 비슷하기 때문이다.[11]

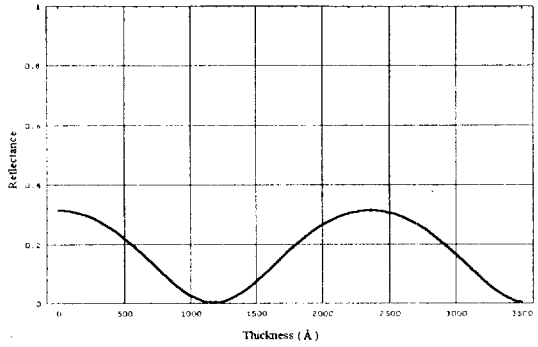



그림 13. $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 $Al_2O_3$ 1개층을 coating 했을 때 두께에 따른 반사율

Fig. 13. Reflectance as a function of thickness for single layer of $Al_2O_3$ on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$

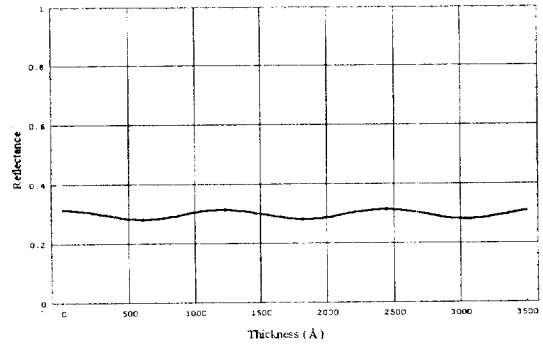



그림 14. $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 위에 Si 1개층을 coating 했을 때 두께에 따른 반사율

Fig. 14. Reflectance as a function of thickness for single layer of Si on the $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$

### 5. Simulation 과 실제 실험결과의 비교

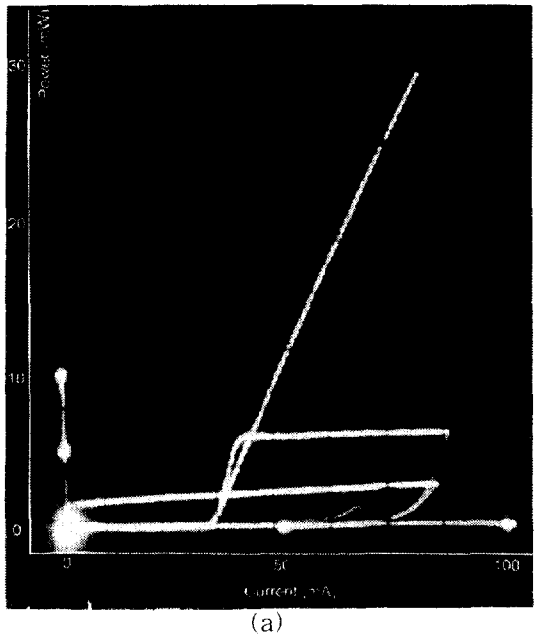
Simulation 을 통하여 확립된 최적 공정 조건인 $Al_2O_3$(1179Å) 1개층의 AR coating과 wafer-$Al_2O_3$(1179Å)-Si(596Å) 순서 4개층의 HR coating 을 상업용 3㎽급 LD 에 적용하여 보았다. AR, HR coating 된 LD 의 전류-출력 특성이 그림 15(a) 에 나타나 있고 AR, HR coating 을 하지 않은 LD 의 전류-출력 특성이 그림 15(b) 에 나타나 있다.

실제 실험 결과 AR, HR coating 을 한 경우, 하지 않은 경우보다 quantum efficiency 가 약 1.7배 증가하였으며, 최대 출력은 약 1.63배 증가함을 알 수 있다. 이는 AR, HR coating 이 실제 LD 의 출력향상에 크게 기여함을 보여준다. Simulation 결과와 실제 quantum efficiency 증가율의 차이 (simulation : 2배, 실제 : 1.7배) 는 공정상 발생하는 각 층의 두께 오차를 감안하면 매우 작은 것으로 생각할 수 있다. 그러므로 이는 본 연구에서 개발한 simulator 의 유효성을 잘 나타내는 것이라 하겠다.

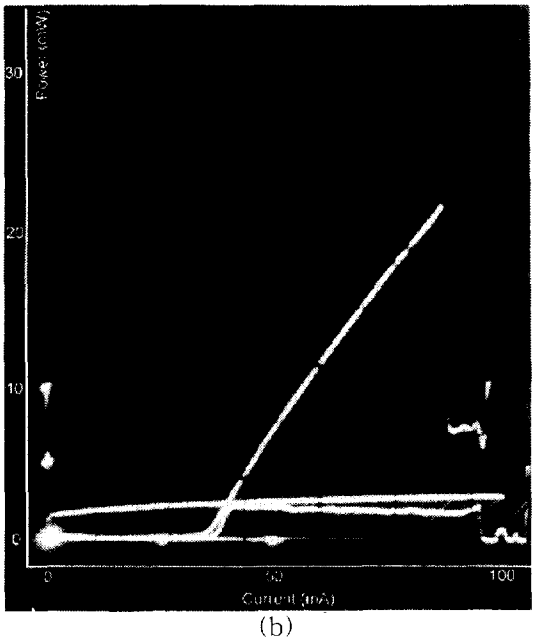
### 6. 결 론

LD 의 광학적 model 에 대한 Maxwell 방정식을 operator 변환에 의해 정립하여 각 박막과 다층 박막을 표현하는 행렬을 구했으며, 이 행렬에 의하여 반사율을 구함으로써 PC 에서 동작할 수 있는 AR, HR coating simulator 를 개발하였다. HR, AR coating 의 효과를 얻기 위해서 2개의 굴절률이 다른 일정한 두께의 유전막을 반복 배열하는 simulation 을 수행하였으며, 접착성이 뛰어난 $SiO_2$/$Si_3N_4$ 계와 $Al_2O_3$/amorphous-Si 계에 본 연구에서 개발한 simulator 를 적용하였다. HR coating 용 film 으로는 넓은 두께 영역에서 90% 정도의 반사율을 가지며, 적은 층수가 사용된 배열인 wafer-$Al_2O_3$(1179Å)-Si(596Å) 의 순서의 4개층이 적합함을 알 수 있었다. AR coating 용 film 으로는 넓은 막 두께 영역에 대해 저 반사율을 보이고, 경도가 크고 GaAs wafer 와의 접착력이 뛰어난 $Al_2O_3$(1179Å) 1개층이 적합함을 알 수 있었다. Mirror 보호막으로는 $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 의 굴절률 (n = 3.56)과 비슷하여, 두께 변화에 대한 반사율의 변화가 거의 없고 coating 을 하지 않았을 때와 반사율이 거의 같은 a-Si(596Å) 1개층(n = 3.48)을 coating 한 것이 적합하였다.

Simulation 결과 약 2배의 quantum efficiency




(a)




(b)

**그림 15.** (a) AR, HR coating 한 경우와 (b) coating 하지 않은 경우, LD 의 전류-출력 특성

**Fig. 15.** I-V characteristics of Laser Diodes for (a) AR, HR coatings and (b) non-coating

의 증가가 예상되었는데 최적화한 공정 조건에 따라서 실제 LD 를 제작한 결과 qunatum efficiency

는 1.7 배 증가하였다. 이는 실제 공정에서 발생하는 각 층의 두께 오차를 감안하면 simulation 결과와 실제 경우가 잘 일치함을 보여준다.

※ 본 연구는 1994년도 인하대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌


1. Dan Botes, "Recent development in high power single element fundamental mode Diode Lasers", Laser Focus/Electro optics, vol. 23, no. 3, pp. 68~79, March 1987
2. David Wood, "Optoelectronic Semiconductor Devices", Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 201~202, 1994
3. Jeff Hecht, "The Laser Guidebook" 2nd Ed., McGraw Hill, Inc., pp. 309~310, 1992
4. Kazuhisa Takahashi, Kenji Ikeda, Jun Ohcawa, and Wataru Susaki, "High Efficiency and High Power AlGaAs GaAs Laser", IEEE J. Quantum electronics, vol. QE 19, No. 6, pp. 1002~1008, June 1983
5. I. Kaminow, G. Einstein and K. Stultz, "Measurement of the Modal Reflectivity of an Antireflection Coating on a Superluminescent Diode", IEEE J. Quantum Electron QE 19, pp. 493-495, 1983.
6. K. Dutta, P. Deimel, "Optical Properties of a GaAlAs Superluminescent Diode", IEEE J. Quantum Electron. QE 19, pp. 496-498, 1983
7. Y. Katagiri and H. Ukita, "Ion Sputtered $(SiO_2)_x$ and $(Si_3N_4)_x$ Antireflection Coatings on Laser Facets Produced using $O_2$ $N_2$ Dischages", Appl. Opts. Vol. 29, No. 34, pp. 5074-5079, 1990
8. Grant R. Fowles, "Introduction to Modern Optics" 2nd Ed., Holt, Rinehart and Winston, pp. 96-103, 1975
9. Eugene Hecht, "Optics" 2nd Ed., Addison wesley, pp. 100~102, 1987
10. Antonio Redondo and Jerome G. Beery, "Thermal conductivity of optical coatings", J. Appl. Phys., vol. 60, no. 11, pp. 3882~3885, 1986
11. Joseph T. Verdeyen, "Laser Electronics" 2nd Ed., Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, p. 390, 1989


## 저자소개

**류정선**

1971년 3월 20일생. 1994년 2월 인하대학교 전자재료공학과 졸업(B.S.). 1994년 3월~현재 인하대학교 전자재료공학과 석사과정.

**윤영섭**

1952년 9월 7일생. 1975년 2월 서울대학교 금속공학과 졸업. 1977년 2월 한국과학원 재료공학과 졸업(M.S.). 1988년 12월 U.S.C. 전자공학과 졸업(Ph.D). 1987년 3월 88년 5월 Oklahoma State Univ. 대우교수. 1988년 12월~89년 6월 UCLA Device Research Lab. 연구원. 1989년 8월~92년 2월 삼성전자 기흥반도체연구소 수석연구원. 1992년 3월 현재 인하대학교 전자재료공학과 부교수.