

반도체 레이저 단면의 실시간 무반사 및 고반사 코팅*

김효상 · 박홍진 · 황보창권

인하대학교 물리학과

김 부 군

숭실대학교 전자공학과

김형문 · 주홍로

한국전자통신연구소 화합물반도체연구부 광전자연구실

(1997년 1월 7일 받음)

1.55 μm InGaAsP MQW FP 반도체 레이저 단면의 무반사 코팅 두께를 앞면에 무반사 코팅하는 동안 뒷면의 출력을 실시간으로 측정하여 결정하였다. 굴절률 1.85인 SiO_2 박막의 최적 두께는 188 nm이고, 무반사 코팅 전,후의 문턱전류비로 계산한 단면의 반사율은 약 2×10^{-4} 이었다. 무반사 코팅 후 주입전류 60 mA일때 출력이 87%, 기울기 효율이 3.4배, 문턱전류가 2.64배 증가하였다. 또한 실시간으로 Si/SiO_2 박막의 고반사 코팅을 뒷면에 한 후 코팅 전보다 출력이 약 160% 향상되었고, 기울기 효율이 3.8배 증가하였으며, 문턱전류는 1.07배로 코팅 전과 거의 비슷하여, 무반사 및 고반사 코팅 후 반도체 레이저의 출력특성이 크게 향상되었다.

I. 서 론

반도체 레이저는 기본적으로 양단에 반사면을 가지는 양피드백(positive feedback)구조의 소자이므로, 양면에 무반사 코팅을 하거나, 한면에 무반사 코팅과 반대면에 고반사 코팅 또는 양면에 적절히 반사 코팅을 할 경우 반사율 변화에 따른 레이저 출력의 변화는 응용면에서 연구해 볼 만한 가치가 있다.

무반사 코팅의 설계와 제작에 관한 연구는 진행과정 반도체 레이저 광증폭기에서 원하지 않는 Fabry-Perot 공명을 피하기 위하여, 또는 반도체 레이저의 광점속 효율을 높이거나 초발광 반도체 레이저 등의 출력특성을 향상시키기 위해 폭넓게 진행되어 왔다.^[1-3] 특히 매우 낮은 반사율을 갖는 박막을 제작하기 위하여 박막을 증착하면서 박막의 굴절률과 두께를 실시간(in-situ)으로 조절하는 연구가 진행되었다. Landreau 등은^[4] 전류를 일정하게 흘려줄 때 단면의 반사율이 감소하면 공동(cavity)내에 있는 출력이 감소되고, quasi-Fermi 준위의 간격이 커지게 되며, 이 결과 순방향 전압이 증가하는 원리를 이용하여 순방향 전압이 최대인 곳에서 무반사 코팅의 최적 두께를 찾았다. Wu 등은^[5] 타원해석기를 이용하여 실시간으로 최적굴절률과 두께를 찾는 방법을 고안하였다. 또한 초소전력의 광전소자로 사용되는 매우 낮은 문턱전류를 가진 반도체 레이저를 만들기 위해 고반사 코팅을 하는 연구가 전개되었으며^[6], distributed feedback 반도체 레이저는 한 면에 무

반사 코팅을 하고 다른 면에는 고반사 코팅을 하여 출력을 증가시킬 뿐 아니라 모드 선택율을 높여서 다중 모드로 발진되던 레이저를 단일 모드로 발진시켜 수율을 높이고 있다.^[7]

본 연구에서는 비교적 간단한 장치로 1.55 μm InGaAsP MQW FP 반도체 레이저에 무반사 코팅을 하면서 뒷면의 출력을 측정하여 무반사 코팅의 최적두께를 찾는 실험을 하였다. 반도체 레이저에서 유도 방출이 매우 큰 경우 양단면으로 나오는 총 출력을 P_{out} 이라 하면 $P_1 + P_2 = P_{out}$ 이 된다. 양 단면의 반사율이 $R_1 = R_2$ 이면 $P_1 = P_2 = P_{out}/2$ 가 되어 양쪽 단면으로 나오는 출력은 같게 된다. 만약 무반사 코팅을 하여 $R_1 \cong 0$ 이면 단면 2에서 반사되어 온 빛은 단면 1에서 반사되지 않고 레이저 출력으로 나가게 되므로 단면 2로 나오는 출력은 줄어들게 된다. 이러한 원리를 이용하면 굴절률이 주어진 박막을 무반사 코팅하면서 반대면의 출력이 최하가 되는 무반사 코팅 두께를 찾을 수 있다. 한편 단면 1에 증착된 무반사 코팅으로 인하여 높아진 문턱전류를 낮추고 출력을 증가시키기 위하여 반대면에 고반사 코팅을 하였다. 고반사 박막은 Si와 SiO_2 를 교대로 증착한 다층 박막으로 제작하였으며, 매층마다 출력특성을 조사하였으며 단면 1에서의 출력을 측정하여 문턱전류를 측정하였다.

II. 이 론

반도체 레이저는 양끝 단면의 반사율 변화에 따라 반도체 레이저 활성층 영역에서의 광자 밀도가 변하고 또한 활성층 영역으로 반사되어 돌아가는 광자수에 따라 이득이 변하게 되므로 출력, 문턱전류, 기울기 효율 등이 변화하게 된다.

*본 연구는 1995년 한국전자통신연구소의 연구비 지원, 인하대학교 박사 후 연구과정의 지원 및 1996년도 기초과학 학술연구 조성비(거점연구 BSRI-96-2429) 지원으로 수행되었습니다.

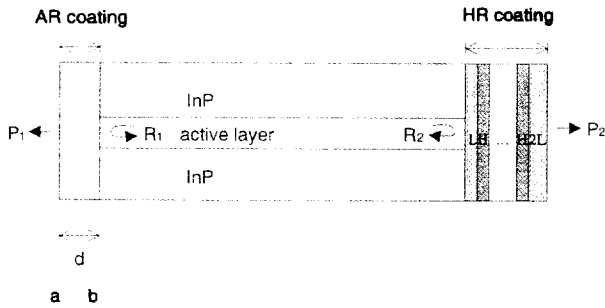


그림 1. 무반사 코팅과 고반사 코팅의 개략도

무반사 코팅시 박막의 두께를 변화시키면 단면의 반사율이 변하고, 이에 따라 단면의 출력은 변하게 된다. 그림 1과 같이 구성된 반도체 레이저 단면의 출력은 P_1, P_2 라 하고 단면의 반사율이 R_1, R_2 인 경우 양단면에서 나오는 출력 P_1, P_2 는

$$P_1 = \frac{(1-R_1)\sqrt{R_2}}{(\sqrt{R_1}+\sqrt{R_2})(1-\sqrt{R_1R_2})} h \nu v_g \alpha_m V N_{ph} \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{(1-R_2)\sqrt{R_1}}{(\sqrt{R_1}+\sqrt{R_2})(1-\sqrt{R_1R_2})} h \nu v_g \alpha_m V N_{ph} \quad (2)$$

이다.^[8] 여기서, α_m 은 저울손실이고 공진기 길이가 L 일때 $\alpha_m = (1/2L) \ln(1/R_1R_2)$ 이며, V 는 활성층 체적, N_{ph} 는 활성층에서의 광자밀도이다. 식 (1), (2)에서 무반사 코팅을 하여 R_1 을 감소시키면, P_1 의 출력은 증가하고 반대면의 출력 P_2 가 감소하는 것을 알 수 있다.

반도체 레이저에 전류를 흘려주면 활성층 영역의 운반자 밀도(carrier density)가 증가하고, 따라서 이득이 증가하게 된다. 전류를 점차 증가시키면 레이저 내부의 손실과 양단 거울에 의한 손실이 이득과 같아지고, 이때의 문턱전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{th} = k \left[\alpha + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right) \right] + d J_o \quad (3)$$

여기서 d 는 활성층 두께, α 는 내부손실, J_o 는 규격화된 전류밀도, 그리고 k 는 가둠인자(confinement factor)와 관계되는 상수이다. 식 (3)으로 부터 무반사 코팅에 의하여 $R_1 \cong 0$ 이면 문턱전류가 증가하고, 고반사 코팅에 의하여 $R_2 \cong 1$ 이면 문턱전류가 감소함을 알 수 있다.

한편 미분외부양자효율(differential external quantum efficiency) η_d 는

$$\eta_d = \eta_i \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_m}} = \frac{2q}{h \nu} \frac{dP_{out}}{dI} \quad (4)$$

으로 주어지며, 여기서 η_i 는 내부양자효율(internal quantum efficiency)이다. 문턱전류보다 큰 전류에서는 유도방출이 자발방출보다 매우 크므로 내부양자효율은 약 1로 볼 수 있다. $R_1 \cong 0$ 이면 α_m 이 증가하므로 η_d 가 증가하며, I-L(current-light power) 곡선에서 측정가능한 출력기울기효율(dP_{out}/dI)이 증가한다.

III. 무반사 코팅 증착 및 출력특성

3.1. 증착 조건

무반사 코팅은 그림 2과 같이 회전펌프와 확산펌프로 구성된 원통형의 진공증착기에서 증착하였다. 기본진공은 1.0×10^{-6} torr 이하였으며, 증착되는 박막의 두께와 증착률은 수정자 두께 측정기(Edwards, FTM-5)를 사용하여 측정하였다.

증착 물질로는 증착율과 산소분압을 조절하여 굴절률을 조절할 수 있는 SiO(Merck, 99.99%)를 열저항 증착법을 사용하여 W보트에서 승화시켜 SiO₂ 박막을 증착하였다. 굴절률은 슬라이드 글라스위에 증착한 SiO₂ 박막을 분광광도계(Hitachi, U 4001)로 투과율을 측정한 후 포락선 방법^[9](envelope method)으로 결정하였다.

3.2. 박막의 굴절률 및 두께

정확한 무반사 코팅 조건은 반도체 레이저의 빔이 도파관

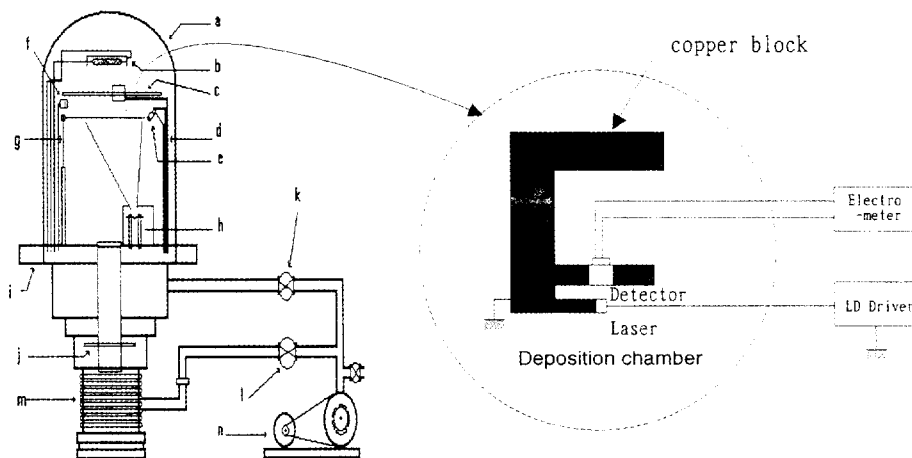


그림 2. 반도체 레이저의 실시간 무반사 코팅과 고반사 코팅 두께 측정 장치

모드이므로 파수벡터가 다른 여러 개의 평면파의 합으로 이루어져 있고, 구조적으로 활성층이 다층으로 구성되어 있어, 이들을 모두 고려하여 설계하여야 한다.^[11] 본 연구에서는 다층 활성층의 유효굴절률을 계산하여 단일층으로 간단하게 가정하였으며, 도파관을 진행하는 파를 박막에 대하여 수직으로 입사하는 평면파로 가정하여 계산하였다. 무반사 코팅을 위한 굴절률(n_f)은 Fresnel 방정식으로 부터 $\lambda/4$ 광학두께에서 활성층의 굴절률이 n_o 일때 $n_f = \sqrt{n_o}$ 로 주어지며, 활성층의 유효굴절률 n_o 가 3.43일때 $n_f=1.852$ 가 된다. 두께 d_f 는 입사파장이 λ 일때 $d n_f = \lambda/4$ 를 만족해야 하므로 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 와 $n_f=1.852$ 에서 209 nm 가 된다.

SiO_x 박막의 굴절률은 증착율을 변화시켜 조절하였다. 산소의 원소조성비인 x 를 1에서 2까지 조절할 경우 파장 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 SiO_x 박막의 굴절률은 1.86부터 1.44까지 변화한다.^[10] SiO 를 열저항법으로 승화시키면 Si와 O가 분리되었다가 다시 결합하여 증착하며 이때 챔버내에 잔류했던 O_2 혹은 O와 함께 결합한다. 증착율을 작게하면 Si와 O의 반응하는 시간이 길어지므로 x 가 증가해 굴절률이 작아지고, 증착율을 크게하면 상대적으로 Si와 O의 반응하는 시간이 짧아져 굴절률이 증가한다. 증착율 0.5 nm/sec 와 1 nm/sec 로 증착하였을 때의 굴절률의 변화를 그림 3에 나타내었다. 증착율 1 nm/sec 일때 파장 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 굴절률 1.85인 SiO_x 박막을 얻을 수 있었다.

박막의 두께 d 에 따라 변하는 단면반사율 R_1 을 식 (2)에 대입하여 뒷면의 출력 P_2 를 계산하였다. 박막의 반사율은 다음과 같은 특성행렬을 이용하여 계산하였다.^[11]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & j \frac{\sin \delta}{n_f} \\ in_f \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 B와 C는 각각 규격화된 전기장과 자기장이고, n_f 와

n_s 는 각각 박막과 기판의 굴절률이다. δ 는 그림 1에서 파장 λ 인 빛이 수직으로 입사할 때 두께 d 인 박막의 광학위상두께이며

$$\delta = \frac{2\pi n_f d}{\lambda} \quad (6)$$

이다. 박막의 광학어드미턴스는 $Y=C/B$ 이므로 반사율 R 은

$$R = \left| \frac{n_o - Y}{n_o + Y} \right|^2 = \left(\frac{n_o B - C}{n_o B + C} \right) \left(\frac{n_o B - C}{n_o B + C} \right)^* \quad (7)$$

이다. 여기서 n_o 는 공기의 굴절률이다. 단층박막의 반사율은 비교적 간단하게

$$R = \frac{(n_o - n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_o n_s / n_f - n_f)^2 \sin^2 \delta}{(n_o + n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_o n_s / n_f + n_f)^2 \sin^2 \delta} \quad (8)$$

로 표현된다. 식 (8)에서 $n_s=3.43$, $n_f=1.852$ 일 경우 두께의 증가에 따른 반사율을 계산하고, 이 값과 표 1의 파라미터를 식 (2)에 대입해 출력 P_2 를 계산하여 그림 4에 실선으로 표시하였다. 그림 4에서 계산된 출력 P_2 는 증착두께가 얇을 때는 변화가 작으나 $\lambda/4$ 두께인 209 nm 에서 급격히 감소하여 거의 0 이고 $\lambda/4$ 근처에서 매우 민감함을 알 수 있다. 두께를 계속 증가시키면 출력이 증가하여 $\lambda/2$ 두께인 418 nm 에서 코팅 전과

표 1. 계산에 사용된 반도체 레이저의 파라메타 값.^[12]

파라메타	기호	값
활성층 영역 길이	L	$300 \mu\text{m}$
활성층 영역 두께	d	$0.1 \mu\text{m}$
내부 손실	α	40 cm^{-1}
규격화된 전류 밀도	J_o	$3800 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$
confinement factor와 관계된 상수	k	4×10^3
코팅 전 단면의 반사율	R_1, R_2	0.30

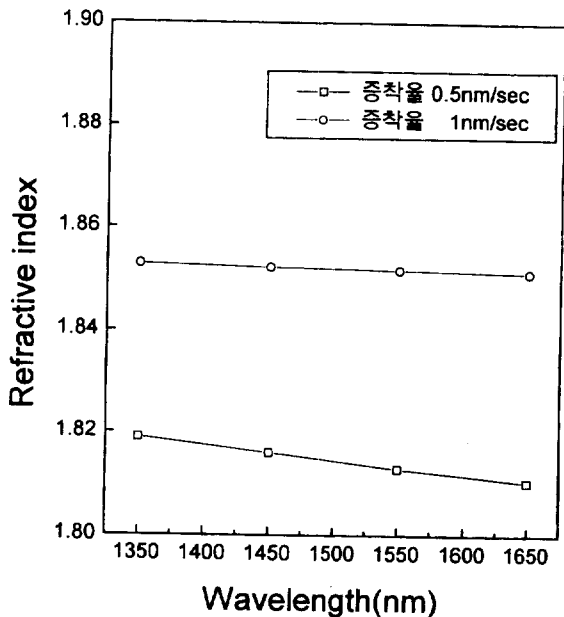


그림 3. 증착율 변화에 의한 SiO_x 박막의 굴절률 분산

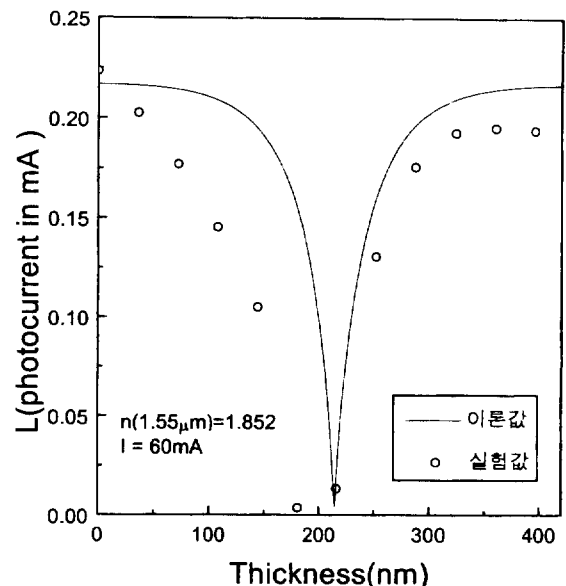


그림 4. SiO_x 박막의 두께의 증가에 따른 반대면에서의 출력(P_2)

같은 최대값을 나타내고 있다. 이는 $\lambda/2$ 박막이 기관에 대하여 부재(absentee)층이므로 $\lambda/2$ 박막을 증착했을 때의 반사율이 기관의 반사율과 같기 때문이다.

3.3. 실시간 증착 및 출력특성

시료는 $1.55 \mu\text{m}$ InGaAsP MQW FP 반도체 레이저를 사용하였으며, 코팅 전의 출력특성을 측정하였고, 반도체 레이저 뒷면의 출력을 실시간으로 측정하기 위하여 그림 3과 같은 장치를 구성하였다. 반도체 레이저 활성층의 온도가 상승하면 새는 전류(leakage current)가 많아져 문턱전류가 높아지고, 전류변화에 대한 이득이 감소해 출력이 감소하게되므로, 온도를 일정하게 유지시켜주는 것이 중요하다. 증착시 물질을 증발시키는 보트로부터 나오는 열로 인하여 반도체 레이저의 온도가 상승하는 것을 막기 위하여 냉각수가 구리 방열블락 주위를 흐르도록 하였다.

먼저 박막 두께의 증가에 따라 뒤로 나오는 출력 P_2 의 변화를 관측하기 위한 초기 실험으로 두께를 무반사 코팅 두께의 두배인 $\lambda/2$ 까지 증가시키며 P_2 를 측정하였다. 온도에 의한 영향을 없애기 위해 30 nm를 증착할 때마다 일정시간 식힌 뒤 코팅 전의 온도와 같은 26°C 에서 출력을 측정하였으며, 그림 4에 열린점으로 표시하였다. 두께가 증가함에 따라 출력 (P_2)는 감소하여 $\lambda/4$ 두께 근처인 188 nm에서 최소이고, 계속 증가함에 따라 P_2 가 증가하여 $\lambda/2$ 두께 근처인 378 nm에서 최대를 나타내고 있다.

코팅된 반도체 레이저의 단면 반사율 측정은 코팅 전과 후의 문턱전류비(threshold current ratio)방법을 이용하였다.^[12] 코팅 전 문턱전류(I_{th}'')와 코팅 후의 문턱전류(I_{th})의 상대적 비를 코팅전 반사율(R_1'')과 코팅후 반사율(R_1)로 나타내면

$$\frac{I_{th}}{I_{th}''} = \frac{k \left[\alpha + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] d J_o}{k \left[\alpha + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1'' R_2} \right) \right] + d J_o} \quad (9)$$

와 같다. 박막의 두께에 따라 외삽법을 이용하여 문턱전류를 측정하였고, 문턱전류비와 반사율을 두께의 증가에 따라 그림 5에 나타내었다. 식 (9)의 파라메타는 표 1의 값을 사용하였다. 그림 5로부터 두께가 약 188 nm일 때 문턱전류비(I_{th}/I_{th}'')가 2.38이며 R_1 이 5×10^{-4} 임을 알 수 있다.

이번에는 정확히 무반사 코팅만을 다른 시료에 증착하기 위하여 두께 160 nm까지 20 nm씩 증착한 후 출력특성을 측정하고 160 nm 부터 실시간으로 무반사 코팅을 하면서 P_2 의 출력을 관측하였다. 이때 반도체 레이저에 가한 전류는 무반사 코팅시 문턱전류가 증가할 것을 고려하여 코팅 전 문턱전류보다 3배 이상 높은 60 mA로 하였다. 그림 6은 증착 두께에 따른 출력의 변화이다. 두께 188 nm에서 뒷면의 출력은 거의 0으로 최소값을 나타내고 있으며, 평면파로 가정하고 계산한 209 nm와 약 10% 차이가 있다. 실험값이 계산값과 일치하지 않는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 여러층의 도파

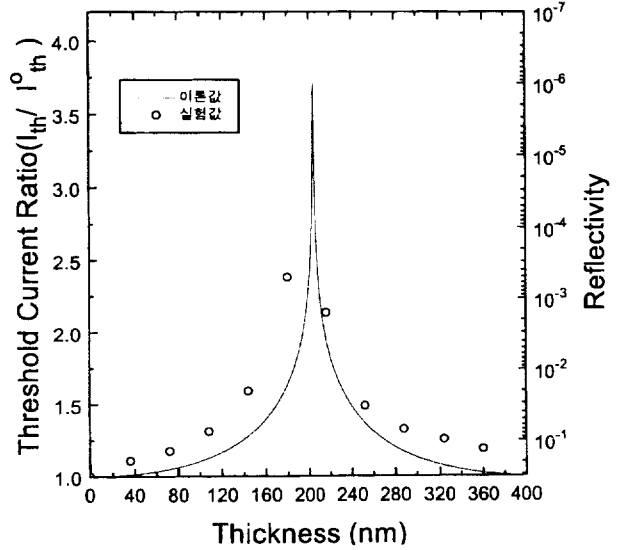


그림 5. SiO_x 무반사 박막의 두께에 따른 문턱전류비(I_{th}/I_{th}'') 및 반사율

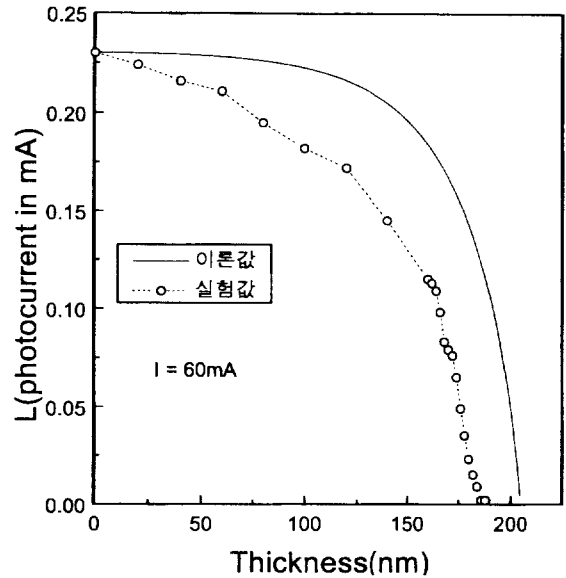


그림 6. SiO_x 박막의 두께에 따른 뒷면에서의 반도체 레이저 출력

관 구조를 유효굴절률로 대체하였고 활성층의 모드를 간단한 평면파로 가정하였으며, 반도체 레이저 파라메타 중 일부는 다른 논문에서 인용하였고^[12], 실시간 코팅을 하는 동안 냉각을 하고 있으나 챔버 안의 증착원으로부터 발생하는 온도 변화에 따른 반도체 레이저의 물성인 각 파라메타가 변화된 것을 고려하여 계산하지 않았기 때문으로 판단된다.

P_2 의 출력이 최소가 되는 두께에서 증착을 멈추고, 챔버에서 꺼내어 무반사 코팅 전, 후의 양쪽 단면의 출력특성을 비교하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 코팅 전 양면에서의 출력이 거의 비슷하므로 코팅 전 양 단면의 반사율이 거의 같음을 알 수 있다. 무반사 코팅 후 주입전류 60 mA에서 출력은 0.63 mA(photocurrent in mA, 이하 mA로 표기함)에서 1.18 mA로 증가하였으며, 주입전류 79 mA에서 최대 출력인 1.42

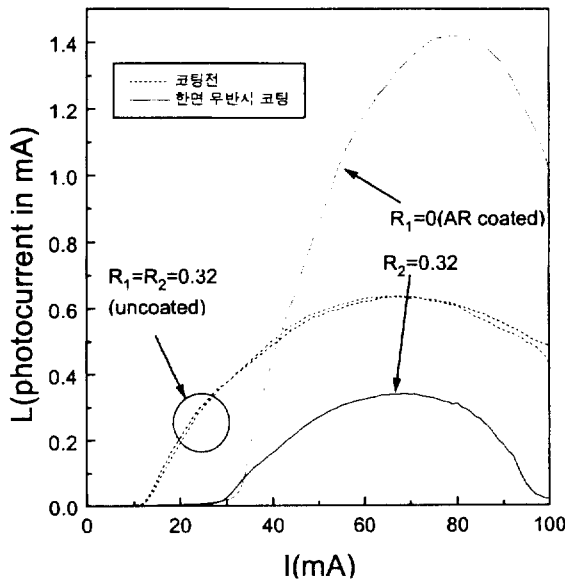


그림 7. 무반사 코팅 전, 후의 I-L 곡선

mA를 얻을 수 있었다. 무반사 코팅 후 문턱전류는 12.25 mA에서 32.37 mA로 증가하였으며, 출력 0.3-0.4 mA에서의 기울기 효율은 0.015에서 0.051로 증가하였다. 문턱전류비가 무반사 코팅 후 2.64배 증가하였으며, 그림 5로부터 단면의 반사율은 2×10^{-4} 임을 알 수 있다. 여러 시료에 무반사 코팅을 하면서 실험이 재현가능함을 알 수 있었으며, 무반사 코팅 두께가 시료마다 수 nm 변하는 것은 반도체 레이저 제작시 결정된 반도체 레이저의 파라메타가 조금씩 다르기 때문이라 사료된다.

IV. 고반사 코팅 증착 및 출력특성

4.1. 고반사 코팅

고반사 코팅은 저굴절률(n_L) 물질과 고굴절률(n_H) 물질의 광학적두께를 $\lambda/4$ 씩 교대로 증착한 다층박막으로 설계하였다. $n_o | 2L(HL)^p | n_s$ 와 같이 두 박막을 p 쌍 증착하였을 경우 기준 파장에서 광학어드미턴스 Y 는

$$Y = n_s (n_H/n_L)^{2p} \quad (10)$$

로 주어진다.^[11] 최대반사율 R 은 Y 가 매우 클 때 식 (7)로부터

$$R \cong 1 - 4 \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2p} \frac{n_o}{n_s} \quad (11)$$

로 근사시킬 수 있다. 층수가 많거나 굴절률의 차이가 클수록 반사율이 증가함을 알 수 있다. 적은 층수로 반사율을 높이기 위해 저굴절률 물질로는 SiO_2 를 사용하였으며, 고굴절률 물질로는 파장 1.55 μm 에서 손실이 적으면서^[13] 굴절률이 큰 Si를 사용하였다.

고반사 박막 증착에 사용한 진공증착기는 회전펌프(Edward, EM-80)와 크라이오펌프(CTI, CRYO-TORR 10)가 장착된 박스형 챔버를 사용했으며, 기본진공 1×10^{-6} torr 이하

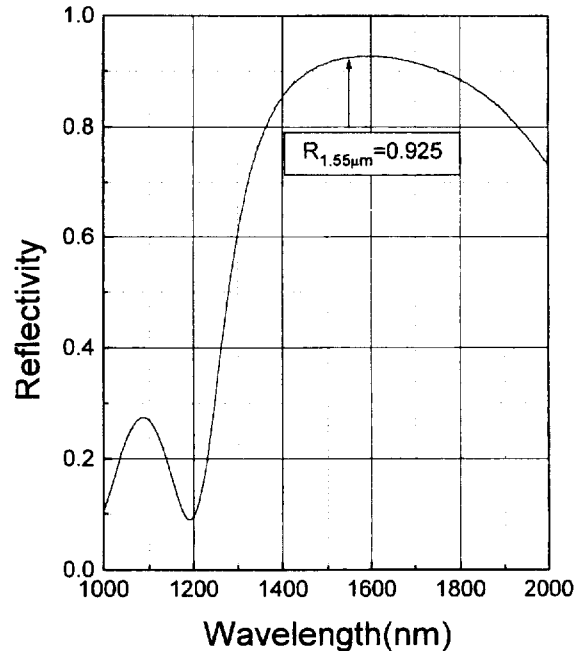


그림 8. $n_o | 2L(HL)^p | Si$ 로 제작된 박막의 파장에 따른 반사율

에서 전자총(Innotec, EB-8)을 사용하여 증착하였다. SiO_2 와 Si의 굴절률은 박막을 두껍게 만들어 Si 박막의 흡수가 적은 적외선 영역에서 투과율을 측정 후 포락선 방법으로 구하였으며, 두께는 수정자 두께 측정기로 맞추었다. 파장 1.55 μm 에서 SiO_2 박막의 굴절률은 증착율 1 nm/sec일 때 1.44이고, Si 박막의 굴절률은 증착율 0.1 nm/sec일 때 2.39이었다.

활성층의 유효굴절률이 3.43일 때 $n_o | 2L(HL)^p | n_s$ 설계의 반사율은 0.946이다. 앞에서 무반사 코팅한 시료의 반대면에 고반사 코팅을 할 때 활성층과 유사한 굴절률인 Si 기판을 옆에 놓아 다층박막의 반사율을 따로 측정하였다. 분광광도계로 측정한 $n_o | 2L(HL)^p | Si$ 의 반사율은 그림 8과 같다. 파장 1.55 μm 에서 반사율 0.925의 최대반사율을 나타내고 있다.

4.2. 실시간 증착 및 출력특성

Si 또는 SiO_2 박막을 $\lambda/4$ 두께 증착하면 챔버 안의 온도는 증착 전 26°C에서 증착 종료시 40°C까지 올라간다. 따라서 온도에 의한 변화를 줄이기 위해 한 층을 증착한 후 초기온도와 같이 냉각하여 출력 특성을 측정하였다. $\lambda/4$ 두께로 증착할 때마다 주입 전류에 따른 레이저 출력을 측정하여 출력, 문턱전류를 계산값과 비교하였다.

고반사 코팅에 따른 문턱전류와 반대면의 출력(P_1)은 코팅 두께의 증가에 따라 특성행렬을 이용하여 전달행렬방법으로 다층박막의 반사율을 계산하고, 이를 식 (1),(3)에 넣어 P_1 과 문턱전류를 계산하였다. R_1 은 무반사 코팅 반사율인 2×10^{-4} 를 사용하였다.

그림 9에서 6층을 증착하는 동안 두께 증가에 따른 반대면에서 측정한 출력(P_1)과 계산값을 표시하였다. 식 (1)에서 무반사 코팅된 반사율 R_1 이 2×10^{-4} 으로 매우 작으므로 R_2 가 증가하더라도 출력 P_1 의 변화가 매우 작음을 알 수 있다. $\lambda/4$ 두

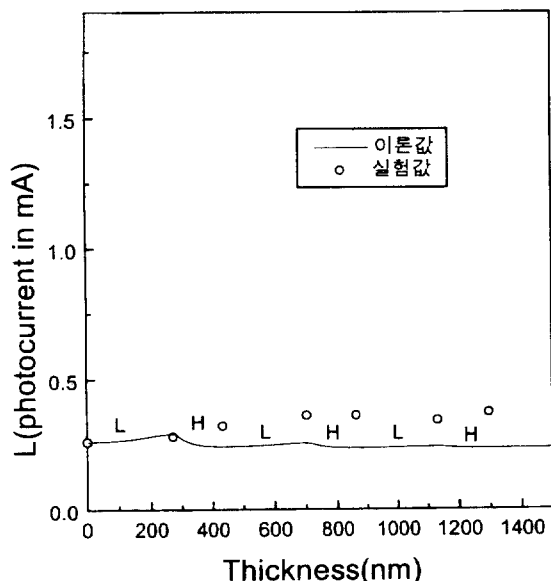


그림 9. 고반사 다층박막의 두께 증가에 따른 반대면에서의 출력(P_1)

계마다 측정된 출력은 전체적으로 변화가 작으나 계산값과는 정확하게 일치하지 않는다. 이는 $\lambda/4$ 두께 증착할 때마다 증착을 중단하고 초기 온도로 내려갈 때까지 기다렸다가 다시 측정할 때에 발생한 측정 오차와 온도 변화시 나타나는 반도체 레이저 파라미터의 변화된 값을 고려한 계산이 이루어지지 않았기때문에 발생하는 오차로 여겨진다.

그림 10에 고반사율 다층막을 증착할 때 측정된 문턱전류와 계산값을 표시하였다. 계산된 값에 의하면 처음 n_L 와 n_H 의 두 층을 증착하였을 때 문턱전류가 매우 낮게 감소하며, 계속 증착할 수록 문턱전류는 점점 작게 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 저굴절률 박막을 증착할 때 반사율이 낮아져 문턱전류가 높아지고, 고굴절률 박막을 증착하였을 때 반사율이

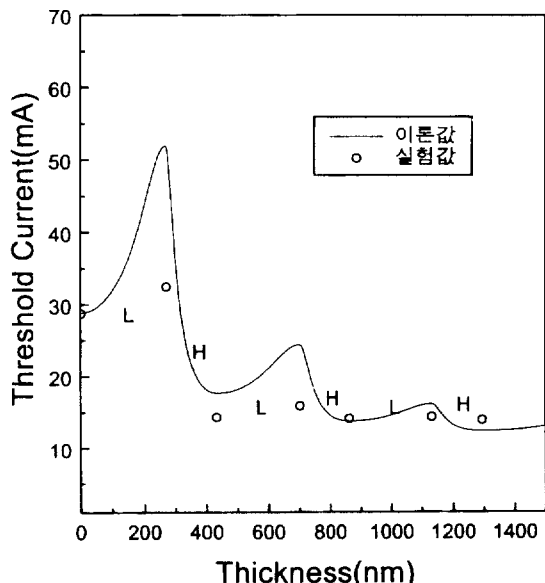


그림 10. 고반사 다층박막의 두께 증가에 따른 문턱전류

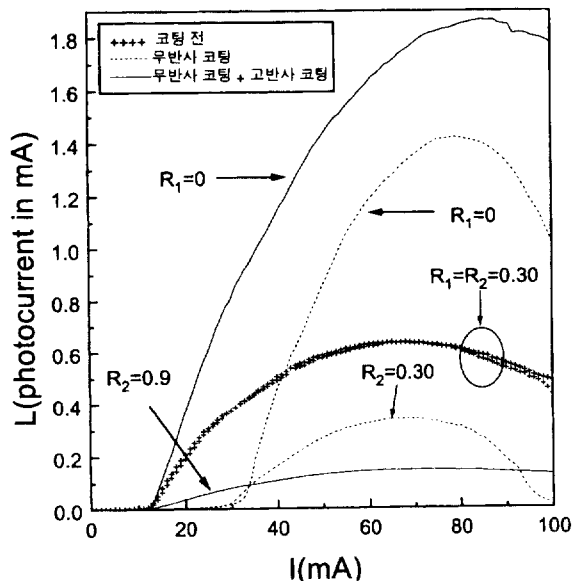


그림 11. 코팅 전, 무반사 코팅 후, 무반사·고반사 코팅 후 I-L 곡선

높아져 문턱전류가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이러한 것은 실험값이 계산값과 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 실험값이 계산값과 정확히 일치하지 않는 것은 계산값이 간단한 평면파로 계산되었고, 반사율 변화에 따라 변하는 실험에 의해 얻어지는 정확한 파라미터 값을 고려하여 계산되지 않았기 때문으로 판단된다. 5층과 6층을 증착하였을 때 문턱전류의 변화는 가장 적었으며 6번째층을 증착하였을 때 문턱전류는 13.16 mA로 떨어졌다.

코팅 전, 무반사 코팅 후, 무반사 코팅·고반사 코팅 후 측정된 I-L 곡선을 그림 11에 나타내었다. 무반사 코팅으로 인하여 32.37 mA로 높아진 문턱전류가 고반사 코팅으로 13.16 mA로 낮아졌다. 고반사 코팅 후 출력 0.3-0.4 mA에서의 기울기 효율은 0.051에서 0.057로 약간 증가하였으며, 출력은 문턱전류가 낮아짐으로 인하여 주입전류 60 mA일 때 1.18 mA에서 1.63 mA로 증가하였고, 주입전류 87 mA에서 최대출력인 1.86 mA를 얻었다.

코팅 전, 무반사 코팅 후, 무반사·고반사 코팅 후의 출력 특성을 표 2에 요약하였다. 무반사 코팅 후 P_1 이 코팅 전보다 87% 증가하였고, 기울기 효율이 코팅 전보다 3.4배 증가하였다. 문턱전류는 무반사 코팅 후 약 2.64배 증가하였다. 무반사 및 고반사 코팅 후 P_1 은 무반사 코팅 후보다 38% 증가하여

표 2. 코팅 전, 무반사 코팅 후, 무반사·고반사 코팅 후의 출력 특성

파라메타	코팅 전	무반사 코팅 후	무반사·고반사 코팅 후
문턱전류(I_m) [mA]	12.25	32.37	13.16
기울기 효율(SE) (P_1 :0.3-0.4 mA)	0.015	0.051	0.057
출력(P_1) [photocurrent in mA]	0.63	1.18	1.63

코팅 전보다 159% 증가하였고, 기울기 효율은 무반사 코팅 후보다 0.12배 증가하여 코팅 전보다 3.8배 증가하였다. 문턱 전류는 무반사 및 고반사 코팅 후 무반사 코팅 후보다 15.55 mA 감소하였고, 코팅 전보다 0.91 mA 증가하였다.

V. 결 론

1.55 μm InGaAsP MQW FP 반도체 레이저의 단면에 박막이 증착되는 동안 뒷면의 출력을 실시간으로 측정하며 무반사 코팅과 고반사 코팅을 제작하였다. 굴절률 1.852인 SiO_x 박막의 무반사 코팅 최적두께는 반대면의 출력이 최소되는 188 nm이었으며 시료마다 조금씩 차이가 있었다. 무반사 코팅 후 주입전류 60 mA일 때 레이저 출력이 0.63 mA에서 1.18 mA로 87% 증가하였으며, 출력 기울기 효율은 0.015에서 0.051로 3.4배 증가하였다. 문턱전류는 12.25 mA에서 32.37 mA로 2.64배 증가하였다. 코팅 전과 후의 문턱전류비로 반사율을 계산한 단면반사율은 약 2×10^{-4} 이었으며, 다른 시료에도 재현이 가능함을 확인하였다. 무반사 코팅 반대면에 Si/SiO_2 박막으로 고반사 코팅을 하였으며, 각 층을 증착할 때마다 I-L곡선을 측정하여 챔버내에서 문턱전류의 변화를 측정하였으며, 문턱전류가 거의 변하지 않는 3쌍을 증착하였다. 무반사 및 고반사 코팅 후 문턱전류는 12.25 mA에서 13.16 mA로 약간 증가하였으나, 출력(P_i)은 0.63 mA에서 1.63 mA로 증가하였고, 기울기 효율은 0.015에서 0.057로 크게 증가하였다. 무반사 및 고반사 코팅 후 반도체 레이저의 출력 특성이 코팅 전보다 크게 향상되었으며, 다양한 응용 가능성이 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] T. Saitoh, T. Mukai and O. Mikami, "Theoretical analysis and fabrication of antireflection coating on laser-diode facets," *J. Lightwave Technol.* **LT-3**, 288 (1985).
 [2] M. Serenyi and H.-U. Habermeier, "Directly controlled

deposition of antireflection coatings for semiconductor lasers," *Appl. Opt.* **26**, 845 (1987).
 [3] J. Chen, D. Li and Y. Lu, "Experimental and theoretical studies on monitored signals from semiconductor diodes undergoing antireflection coatings," *Appl. Opt.* **30**, 4554 (1991).
 [4] J. Landreau and H. Nakajima, "In situ reflectivity monitoring of antireflection coatings on semiconductor laser facets through facet loss induced forward voltage changes," *Appl. Phys. Lett.*, **11**, 2376 (1990).
 [5] I-Fan Wu, J. B. Dattellis and M. Dagenais, "Real-time in situ ellipsometric control of antireflection coatings for semiconductor laser amplifiers using SiO_x ," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A 11**, 2398 (1993).
 [6] K. Y. Lau, P. L. Derry and A. Yariv, "Ultimate limit in low threshold quantum well GaAlAs semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, **11**, 88 (1988).
 [7] Y. Itaya, K. Wakita, G. Motosugi and T. Ikegami, "Phase control by coating in 1.5 μm distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-21**, 527 (1985)
 [8] G. Agrawal and N. Dutta, *Semiconductor Lasers, 2nd ed.*, (Van Nostrand Reinhold, NY, 61, 1993) pp. 238, 61.
 [9] 황보창권, 진권휘, 박대윤, 이민희, "포락선 방법을 이용한 흡수가 작은 박막의 광학 상수 및 두께결정," *한국광학회지* **3**, 1(1992).
 [10] *Properties of SILICON*, (INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London and New York, 1988) pp. 1012-1023.
 [11] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters 2nd ed.*, (New York : Macmillan, 1986) pp. 165.
 [12] H. Ukita, K. Mise and Y. Katagiri, "Simple measurement of the reflectivity of antireflection-coated laser diode facets," *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, L1128(1988).
 [13] J. Stone and L. W. Stulz, "Reflectance, transmittance and loss spectra of multilayer Si/SiO_2 thin film mirrors and antireflection coatings for 1.5 μm ," *Appl. Opt.* **29**, 583(1990).

**Real-time controlled deposition of anti-reflection and
high-reflection coatings for semiconductor laser**

Hyo Sang Kim, Heung Jin Bak and Chang Kwon Hwangbo
Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Bu Kyun Kim
*Department of Electronic Engineering, College of Engineering, Soongsil University,
Seoul 156-743, Korea*

Hyung Mun Kim and Heung Ro Choo
*Optoelectronics Section, Electronics and Telecommunications Research Institute,
Taejon 305-600, Korea*

(Received : January 7, 1997)

We have obtained the optimum thickness of anti-reflection(AR) coating on one of facets of a 1.55 μm InGaAsP MQW FP semiconductor laser by in-situ monitoring of the light emitted from the rear facet during the film deposition on the fore facet. The optimum thickness of SiO_2 thin film whose refractive index is 1.85 was found to be 188 nm. The reflectivity of the coated facet was calculated by the threshold current ratio of before and after AR coating, which was obtained from experimental data, and it was about 2×10^{-4} . The results show that the output power is increased by 87% at bias current 60 mA, the slope efficiency is increased by 3.4 times, and the threshold current is increased by 2.64 times. By in-situ depositing of the Si/SiO₂ thin film HR coating on the rear facet, the output power was increased by 160% than before the AR and HR coatings, the slope efficiency was increased by 3.8 times, the threshold current was increased by 1.07 times, which is similar to the value of before AR coating. Due to the AR and HR coatings the output light power characteristics were enhanced.