

TiO₂와 SiO₂ 박막 쌍을 이용한 광모드 변환기가 집적된 반도체 레이저 단면의 무반사 코팅

송현우^{*} · 김성복 · 심재식 · 김제하 · 오대곤 · 남은수

한국전자통신연구원 반도체원천기술연구소

Ⓣ 305-350 대전광역시 유성구 가정동 161

(2002년 7월 22일 받음, 2002년 9월 24일 수정본 받음)

전자선 증착기를 이용하여 1.3 μm 광모드 변환기가 집적된 반도체 레이저 출력 단면에 TiO₂와 SiO₂ 두 개의 박막 층으로 무반사 증착 하였다. 증착 단면의 최소 단면 반사율 ~10⁻⁵을 얻었고, ~10⁻⁴이하 단면 반사율 밴드 폭은 약 27 nm임을 측정 하였다. 이러한 코팅은 외부 공진기 레이저 광원 및 반도체 광 증폭기 등에 응용 가능하다.

주제어 : antireflection coating, dielectric thin film, TiO₂/SiO₂, semiconductor laser.

I. 서 론

무반사 코팅은 광소자 발전과 함께 다양한 소자에 필요성이 강조되고 있다. 특히, 외부 공진기 반도체 레이저 광원 및 반도체 광 증폭기 등에는 필수적 기술이다. 이러한 소자들에서 계면 반사는 이득, 변조, 잡음 특성 등에서 성능을 열화시키는 원인이 되기 때문이다.^[1] 무반사 코팅을 위한 물질계로는 SiN_x, Al₂O₃/Si/SiO₂, TiO₂/SiO₂ 등이 보고 되고 있다. SiN_x 단일 박막을 무반사 코팅에 사용하는 경우 정밀한 굴절률 조절이 필요하며, 낮은 반사율 영역의 선폭이 좁은 단점이 있다. 그리고, Al₂O₃/Si/SiO₂ 박막 층들을 이용한 넓은 선폭의 무반사 코팅 결과가 보고 되고 있지만, 실시간 증착 두께 조절에 어려움을 안고 있다.^[2] 반도체 소자 단면의 무반사 증착으로는 보통의 단일 이득 영역의 폭 ~30 nm 정도를 아우르면서, 증착 공정이 간단한 TiO₂/SiO₂ 박막 쌍이 좋은 선택이 될 수 있다. 본 논문에서는 전자선 증착기로 TiO₂/SiO₂ 유전체 쌍을 반도체 레이저 단면에 무반사 증착한 결과를 보고 한다.

II. 무반사 코팅 박막의 설계

무반사 증착을 위해 제작된 소자는 MOCVD 방법으로 성장 제작되었으며, 광모드 변환기(spot size converter)가 집적된 1.3 μm 파장의 파브리-페롯(Fabry-Perot) 매립형 양자 우물 반도체 레이저이다(그림 1). InGaAsP 수축 변형된 8개 양자 우물을 매질로 하는 이득 부분에 InGaAsP(λ_g = 1.24 μm)를 선택 영역 성장(selective area growth) 바로 연결(butt joint)하여 모드 변환기 부분을 집적하였다.^[3] 이득 영역과 모드 변환기 영역의 연결 경계 면에서 반사를 억제하기 위해 연결 면을 도파로와 수직인 면에 대해 약 13° 기울였다. 이득 영역과 모

드 변환기를 포함한 소자의 총 길이는 약 600 μm이다. 이 광원은 광섬유와의 연결 효율이 커서 외부 공진기 반도체 레이저 및 반도체 광 증폭기에 적용이 가능한 반도체 소자이다.^[4]

무반사 증착 박막은 평면파 반사(plane wave reflection)를 고려하고, 전달 행렬 방법(transfer matrix method)을 사용하여 설계되었다. TiO₂/SiO₂ 박막 쌍을 이용하여 무반사 증착하였을 때 10⁻⁴ 이하의 반사율을 얻기 위해서 필요한 증착 두께 오차 한계는 각각 TiO₂의 경우 최대 4.3 nm, SiO₂의 경우 최대 6.3 nm로 계산된다(그림 2). 그리고, 10⁻⁴ 이하 반사율을 얻을 수 있는 스펙트럼 밴드 폭은 약 35 nm로 계산된다. 무반사 증착 설계를 위해서 준비된 소자 단면의 굴절률에는 출력 단면에서의 광 모드와 도파로의 굴절률 분포와의 중첩을 고려한 유효 굴절률을 계산하여 사용하였다.

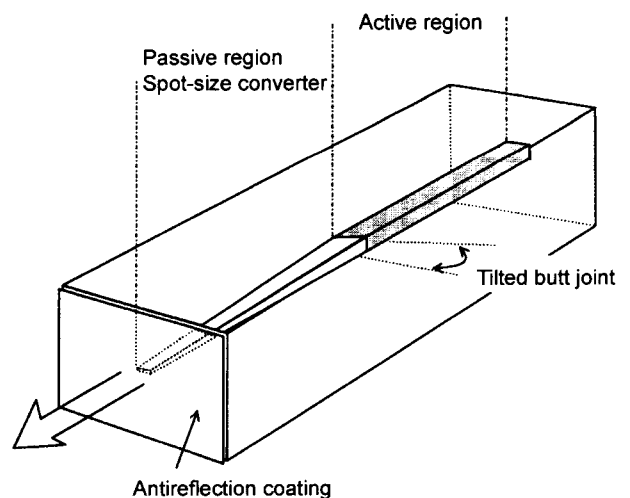


그림 1. 출력 단면에 무반사 코팅된 광모드 변환기가 집적된 반도체 레이저의 개략도.

*E-mail: hwsong@etri.re.kr

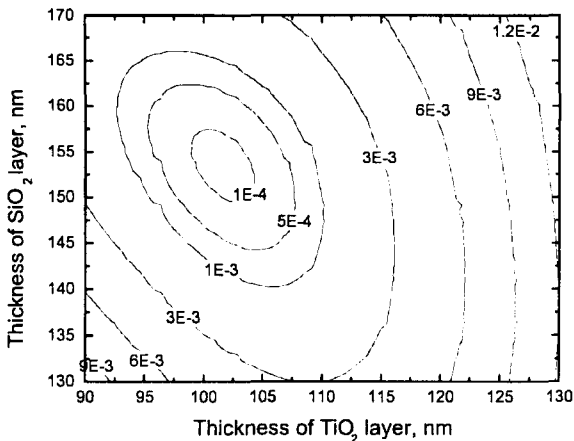


그림 2. 무반사 코팅의 설계 : 10⁻⁴ 이하의 반사율을 얻기 위해서 필요한 증착 두께 오차 한계는 각각 TiO₂의 경우 최대 4.3 nm, SiO₂의 경우 최대 6.3 nm이다.

III. 박막 증착

전자선 증착기를 이용하여 광모드 변환기가 집적된 반도체 레이저 출력 단면에 무반사 코팅하였다. 증착 두께는 증착될 소자와 인접한 규소 기판에 조사된 분광기를 통과한 단색광의

반사 광강도의 변화를 보면서 실시간으로 조절되었으며, 일정한 증착 조건을 유지함으로써 재현성 있는 굴절률을 얻을 수 있었다. 양질의 무반사 코팅을 위해서는 증착되는 유전체 박막의 두께뿐만 아니라 굴절률도 정밀하게 유지되어야 한다.

TiO₂ 박막은 SiO₂ 박막에 비해 증착 조건에 민감하게 굴절률 변화를 보이는 박막 층이다.^[5] 기본 진공도 5×10⁻⁷ Torr, 기판 온도 150°C, 증착 속도 0.1 nm/sec 및 증착시 산소 주입으로 2.5×10⁻⁴ Torr를 유지하였다. 이 경우 증착물을 넣고 첫 번째 증착 박막을 제외하고는 2.08±0.007의 재현성 있는 굴절률을 얻을 수 있었다. SiO₂는 진공도 1×10⁻⁵Torr, 증착 속도 0.4 nm/sec, 기판 온도 150°C를 유지하면서 증착 되었다.

규소 기판 위에 증착된 TiO₂ 및 SiO₂ 박막의 굴절률은 타원 분광기(spectroscopic ellipsometry)법으로 측정되었다(그림 3, 4). TiO₂ 박막의 해석을 위해서 사용된 이론은 포로히-블루머(Forouhi & Bloomer) 모형인데, 실험값과의 오차(χ^2 : I_s & I_p)가 약 12.75로 비교적 잘 일치하였다.^[6,7] 정확한 해석을 위해서 박막의 두께 값을 원자력 현미경(atomic force microscope)으로 측정하여 사용하였다. SiO₂ 박막의 해석을 위해서 사용된 이론은 셀마이어(Sellmeier) 모형인데, 실험값과의 오차(χ^2 : Ψ & Δ)가 약 2.44로 잘 일치하였다.^[5] 규소 기판 위에 증착 박막을 해석 할 때, 박막 증착 이전에 기판 위에 2.5 nm 두께의 조밀한 SiO₂ 박막이 포함되어 있음이 고려되었다. 1.3 μ m 파장에서 TiO₂는 2.080, SiO₂는 1.442의 굴절률이 됨을 측정

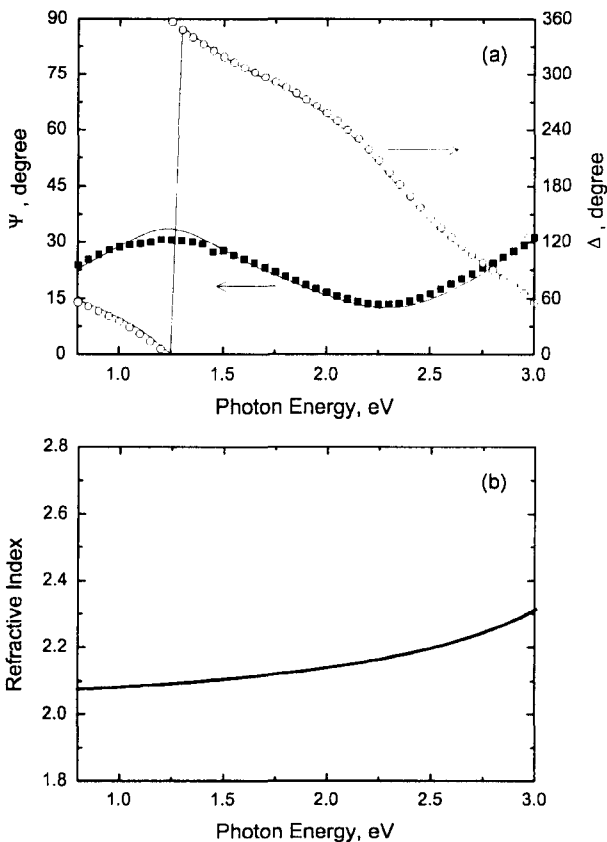


그림 3. 타원 분광기법으로 TiO₂ 박막을 측정된 값(a)과 포로히-블루머(Forouhi-Bloomer) 이론과 비교(fitting)하여 환산된 굴절률 분산 분포(b).

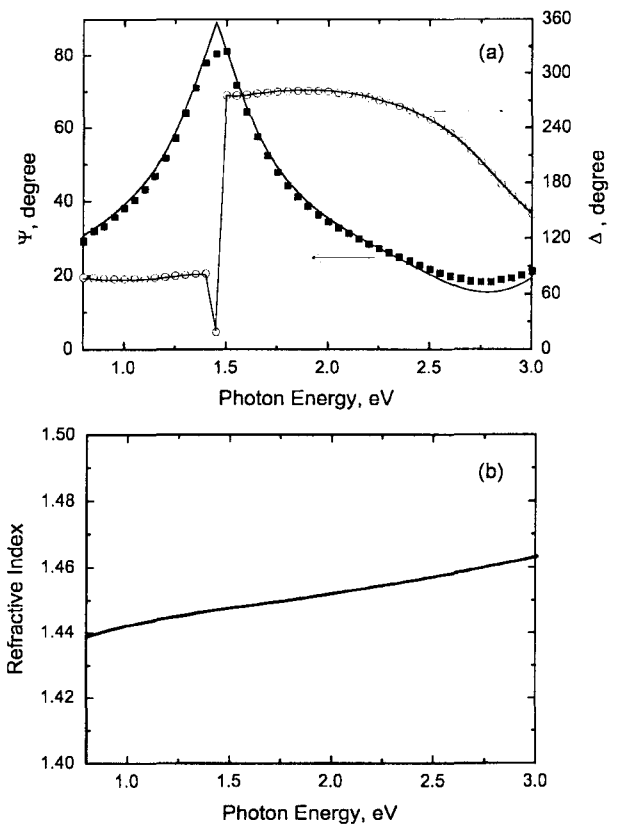


그림 4. 타원 분광기법으로 SiO₂ 박막을 측정된 값(a)과 셀마이어(Sellmeier) 이론과 비교(fitting)하여 환산된 굴절률 분산 분포(b).

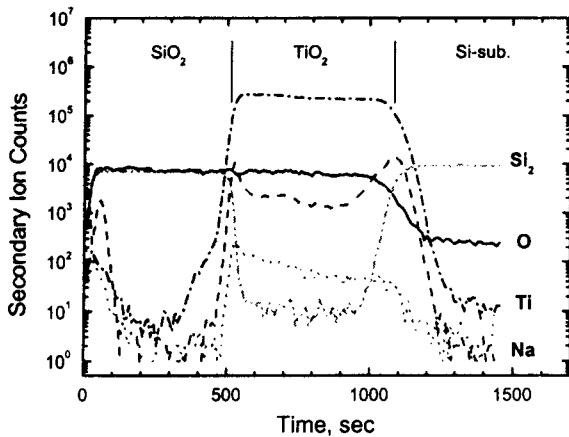


그림 5. 규소 기판에 증착된 TiO₂와 SiO₂ 박막 층의 이차 이온 질량 분석(secondary ion mass spectrometry) 결과.

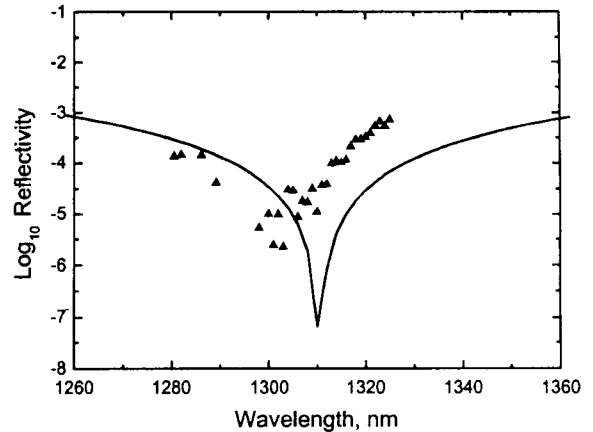


그림 7. 무반사 코팅된 광모드 변환기가 집적된 반도체 레이저에서 출력 단면의 반사율 계산(실선)과 실험(세모 점) 값.

하였다. 증착 두께의 광 감시(optical monitoring)를 위해서는 무반사 코팅의 중심 파장에서의 굴절률뿐만 아니라 광 감시 파장에서의 굴절률을 알고 있는 것이 유리하다. 그리고, 측정된 굴절률 분산 정보는 설계된 광 두께의 반 파장에서 실시간 광 감시 두께 조절에 사용되었다.

TiO₂와 SiO₂ 박막 쌓은 소자 면에서 단단한 박막을 형성하였고, SiO₂ 박막은 두께에 따라서 균일한 조성을 가지고 있음을 측정하였다(그림 5). 이차 이온 질량 분석법(secondary ion mass spectrometry)을 통해서 TiO₂ 박막에 두께에 따라 조성의 불균일성이 있음을 측정하였으며, Na 불순물이 미량 포함되어 있음을 알았다.

IV. 단면 반사율의 측정

무반사 코팅의 반사율은 박막 증착 전후의 광 모드 변환기가 집적된 레이저 다이오드의 일정한 문턱 이하 전류 주입 시 출력 스펙트럼으로부터 측정된다(그림 6). 무반사 증착 하기 전, 문턱 이전의 일정한 주입 전류에 대해서 소자의 출력 스펙트럼을 측정하여 일회 진행 이득(single pass gain: G_s)을 얻는

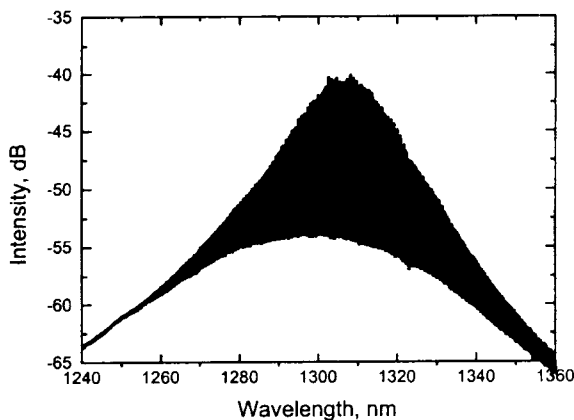


그림 6. 주입 전류 14 mA에서의 무반사 코팅 전과 후의 출력 스펙트럼.

다. 출력 스펙트럼의 파브리-페로(Fabry-Perot) 모드의 국소 최대 최소 비(peak-trough ratio: V)로부터 각 파장에서의 일회 진행 이득(G_s)은 다음 식으로 계산된다.^[1]

$$\sqrt{R_1 \cdot R_2} = \left(\frac{\sqrt{V} - 1}{\sqrt{V} + 1} \right) / G_s \quad (5)$$

단, R₁, R₂는 소자의 각 단면에서의 반사율임.

소자의 출력 면에 무반사 증착을 한 후, 동일한 주입 전류에 대해서 다시 출력 스펙트럼을 측정한다(그림 6). 여기서 측정된 국소 최대 최소 비(V)와 앞에서 측정된 일회 진행 이득(G_s)을 이용하여 무반사 증착 면의 반사율(R₁)을 환산한다.

증착 면의 반사율은 1.3 μm 파장에서 최저 값인 약 10⁻⁵이며, 10⁻⁴ 이하의 반사율을 얻을 수 있는 파장 영역은 약 27 nm 임을 알 수 있었다(그림 7). 이론적으로 얻을 수 있는 반사율 값에 못 미치는 점은 증착 중의 두께 조절 오차 및 TiO₂ 박막의 불균일성에서 그 원인이 있는 것으로 생각된다. 1.3 μm 중심 파장에서의 낮은 반사율 한계는 무반사 증착 면에 의한 것뿐만 아니라 이득 부분과 광모드 변환기 부분의 연결 경계면(butt-joint interface)에 의해서 정해지는 것으로 생각된다.^[8]

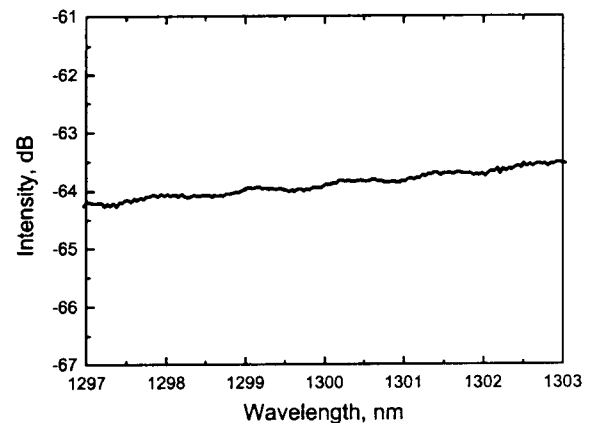


그림 8. 무반사 코팅 후 소자의 1.3 μm 파장 근처에서의 출력 스펙트럼.

왜냐하면 1.3 μm 근처의 좁은 스펙트럼 영역에서 소자의 길이 600 μm에 해당하는 중 모드 간격보다 훨씬 넓은 모드 간격이 측정되기 때문이다(그림 8).

V. 결 론

TiO₂와 SiO₂ 박막 쌍을 이용하여 1.3 μm 광 모드 변환기가 집적된 반도체 레이저의 출력 단면에 무반사 증착 하였고, 중심 파장에서 증착 면의 반사율은 최저 값 $\sim 10^{-5}$ 을 얻었다. 그리고, 10^{-4} 이하의 반사율을 얻을 수 있는 파장 영역은 약 27 nm임을 측정하였다. 1.3 μm 중심 파장에서의 낮은 반사율 한계는 무반사 증착 면에 의한 것뿐만 아니라 이득 영역과 광 모드 변환기 영역의 연결 경계면(butt-joint interface)에 의해서 정해지는 것으로 생각된다. 이러한 무반사 코팅은 외부 공진기 반도체 레이저 광원 및 반도체 광 증폭기에 응용 가능하다.

참고문헌

[1] H. Ghafouri-Shiraz, *Fundamentals of laser diode amplifiers* (John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 1995), Chapter 5.
 [2] D. M. Braun and R. L. Jungeman, "Broadband multilayer antireflection coating for semiconductor laser facets,"

Optics Lett., vol. 20, no. 10, pp. 1154 - 1156, 1995.
 [3] D. H. Jang, J. K. Lee, E. S. Nam, K. H. Park, H. S. Cho, and K. E. Pyun, "The structural properties of spot size converted laser diodes fabricated by butt-joint selective area growth," in *CLEO/Pacific Rim '99*, 1999, F05, pp. 1225-1226.
 [4] 송현우, 김성복, 오대곤, 김제하, 박태상, 박수진, "직접 광 연결된 광섬유 격자 반도체 레이저," 2001 광자기술 학술 회의, 한국광학회, 2001, T1C5, p. 39.
 [5] 황보 창권, 박막 광학(다성 출판사, 서울, 2001), pp. 212-215.
 [6] A. R. Forouhi and I. Bloomer, "Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics," *Phys. Rev. B*, vol. 34, pp. 7018-7026, 1986.
 [7] D. Bhattacharyya, N. K. Sahoo, S. Thankur, and N. C. Das, "Spectroscopic ellipsometry of TiO₂ layers prepared by ion-assisted electron-beam evaporation," *Thin Solid Films*, vol. 360, pp. 96-102, 2000.
 [8] J. J. M. Binsma, P. J. A. Thijs, T. van Dongen, and E. J. Jansen, A. A. M. Staring, G. N. van den Hoven, and L. F. Tiemeijer, "Characterization of butt-joint InGaAsP waveguides and their application to 1310 nm DBR-type MQW gain-clamped semiconductor optical amplifiers," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E80C, no. 5, pp. 675-681, 1997.

Anti-reflection coating on the facet of a spot size converter integrated laser diode using a pair of TiO₂ and SiO₂ thin films

H.-W. Song[†], S.-B. Kim, J.-S. Sim, J. Kim, D.-K. Oh, and E.-S. Nam
Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, KOREA
[†]E-mail: hwsong@etri.re.kr

(Received July 22, 2002, Revised manuscript received September 24, 2002)

Using a bi-layer anti-reflection coating of TiO₂ and SiO₂, we have achieved a minimum facet reflectivity of $\sim 10^{-5}$ and a band width of 27 nm for a reflectivity of 10^{-4} or less for 1.3 μm spot size converter integrated semiconductor lasers. This coating is applicable to external-cavity-tuned laser sources and semiconductor optical amplifiers.

Classification codes : LO.060, OE.050, OM.020.