

1.3 μm 파장 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-Si}$ 박막 에탈론과 광학 상수 측정

송현우[†] · 김종희 · 한원석

한국전자통신연구원 기반기술연구소
 ④ 305-350, 대전광역시 유성구 가정동 161

(2005년 6월 21일 받음, 2005년 10월 7일 수정본 받음)

전자선 증착기를 이용하여 1.3 μm 중심 파장의 파브리-페로 에탈론을 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍으로 증착하였다. 제작된 에탈론의 투과율 및 반사율 스펙트럼을 측정하여, 공진 파장에서 투과 반치폭이 $\sim 12.1 \text{ nm}$ 이며 피네세(finesse) 값은 53임을 알았다. Al_2O_3 단일 박막의 광학 상수는 타원분광기법으로 측정하였다. Al_2O_3 와 a-Si 박막 에탈론의 측정을 통하여 a-Si 박막의 굴절률은 각각 실수부 3.120, 허수부 0.002로 측정하였다. 이러한 박막 쌍은 1.3 μm 파장 표면방출레이저의 출력 반사경으로 사용 가능하다.

주제어 : Thin films, Coatings, Thin films, Optical properties, Mirrors, Vertical cavity surface emitting lasers.

I. 서 론

반사경으로서 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍은 장거리 통신용 1.55 μm 파장 대역의 표면방출레이저 소자에 적용하여 좋은 특성이 보고된 바 있다.^[1] 하지만, 근거리 통신용 파장인 1.3 μm 대역의 박막 반사경으로서 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍의 가능성은 a-Si 박막의 이 파장 대역에서의 흡수량에 의존성을 가지고 있다. 특히, 99% 이상의 높은 반사율을 필요로 하는 1.3 μm 표면방출레이저 소자의 출력 반사경으로서 사용될 때 더욱 그러하다. 스퍼터링(rf sputtering)으로 증착한 a-Si 박막의 경우 1.3 μm 파장 영역에서 측정된 흡수 계수는 0.02 정도임이 보고된 바 있고,^[2] 이러한 때 반도체 기판 위에 증착된 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍의 도달할 수 있는 반사율은 98.7% 정도에 불과하다. 하지만, a-Si 박막은 증착 방법에 따라서 상당히 다른 굴절률과 흡수 계수를 가진다.^[3] 1.55 μm 파장 대역에서 높은 반사율을 얻었던 전자선 증착 방법을 이용하여 1.3 μm 파장 대역에서의 반사경을 제작하고자 한다.^[4] 본 논문에서는 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍의 반사경으로서의 가능성을 가늠하고자 이 박막 쌍을 이용한 유전체 박막 에탈론을 제작하고 측정하여 보고한다.

II. 유전체 박막 에탈론의 구성과 제작

우선, 전자선 증착 방법을 이용하여 Al_2O_3 와 a-Si 각 단일 박막 층을 규소 결정(Si) 기판에 증착하여 각각 타원분광기법으로 측정하였다. 각 박막의 분산 곡선은 고전 분산 모델(classical dispersion model)을 적용하여 타원분광기의 측정치와 적합화(fitting)하였다. 고전 모델을 이용한 분석에 있어서 Al_2O_3 박막의 측정치와 이론치는 잘 일치하였지만, a-Si 박막의 측정치 대 이론치의 오차는 크게 나타났다. 특히, a-Si 박막의 분석에 있어서 얻고자 하는 1.3 μm 파장 주변의 오차는 더욱 크다. 고 반사율의 반사경에 사용하고자 하는 a-Si 박막

표 1. 1.3 μm 파장 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-Si}$ 유전체 박막 에탈론의 단면 구조

물 질	두 겜	파장 대비 광학 두께
a-Si	104 nm	$\lambda/4$
Al_2O_3	201 nm	$\lambda/4$
a-Si	104 nm	$\lambda/4$
Al_2O_3	201 nm	$\lambda/4$
a-Si	104 nm	$\lambda/4$
Al_2O_3	403 nm	$\lambda/2$
a-Si	104 nm	$\lambda/4$
Al_2O_3	201 nm	$\lambda/4$
a-Si	104 nm	$\lambda/4$
Al_2O_3	201 nm	$\lambda/4$
a-Si	104 nm	$\lambda/4$
유리 기판		

의 광학 상수 값을 정확히 측정하고자 더 직접적인 방법인 파브리-페로 에탈론(Fabry-Perot etalon)을 증착하여 측정하는 방법을 택하였다.

전자선 증착기를 이용한 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍의 증착으로 유전체 박막 에탈론을 제작하였다. 유전체 박막 에탈론은 2.5 쌍의 $\lambda/4$ 파장(λ) 두께의 a-Si와 Al_2O_3 박막으로 된 반사경들과 이들 사이에 $\lambda/2$ 파장(λ) 두께 Al_2O_3 박막의 공간 층으로 구성되었다. 면밀히 세정한 슬라이드 유리판 위에 각 박막 층을 순서대로 증착하였는데, 각 박막의 광학 두께를 실시간으로 감시하였다. 백색광을 모노크로메이터에 통과시켜 얻은 단색광을 증착 기판에 반사시켜 반사된 광 강도의 변화를 각 박막의 증착 중 실시간으로 감시하면서, 그 반사광 강도의 최대(혹은 최소)가 되는 시점에 증착을 막는 방식으로 박막의 광학 두께를 정확히 증착할 수 있었다. 이 단색광의 반파장이 증착할 박막의 광학 두께가 되도록 하였다. Al_2O_3 와 a-Si 박막은 전자선 증착기 속에서 기본 진공도 5×10^{-7} Torr, 기판 온도 150 $^\circ\text{C}$, 증착 속도 $\sim 0.4 \text{ nm/sec}$ 를 유지하며 증착되었다.

[†]E-mail: hwsong@etri.re.kr

III. 유전체 박막 에탈론의 측정

제작된 유전체 박막 에탈론의 반사율 밴드를 얻기 위하여 스펙트로포토메터(spectro-photometer)를 이용하여 넓은 파장 영역의 측정을 하였다.(그림 1) 고 반사율(> 95%) 밴드 폭은 $\sim 595 \text{ nm}$ 로 매우 넓은 파장 영역에서 높은 반사율을 제공하는 반사경이 됨을 알았다. 그리고, 1.3 μm 파장 근처에서 강한 공진 투과가 측정되었다. 측정 광원의 크기로 인해, 박막 에탈론의 측정 영역은 직경 16 mm 정도로 매우 크다.

보다 면밀한 분석을 위해서 $\sim 10 \mu\text{m}$ 크기의 광원을 이용하여 공진 투과 스펙트럼과 위치에 따른 공진 투과의 파장 변화를 측정하였다. 광원은 단일 모드 광섬유에 연결된 발광 다이오드(LED)를 사용하였으며, 광 감지기 행렬(optical multi-channel analyzer)을 이용하여 투과 스펙트럼 및 반사 스펙트럼을 측정하였다.(그림 2) 유전체 박막 에탈론은 위치에 따라 공진 투과 파장 변화(약 1.16 nm/mm)를 나타내었다.(그림 3) 이것은 증착 박막의 비균일 특성(non-uniformity)을 반영하고 있고, 직경이 큰 광원으로 측정된 공진 투과 선 폭이 직경이 작은 광원을 이용한 것 보다 현저히 크게 측정된 이유가 된다. 또한, 공진 투과(혹은 반사) 스펙트럼의 중첩으로 인해서 최대 투과율(혹은 최소 반사율) 값의 현저한 차이로 나타났다. 즉, 공진 투과의 측정에 있어서 (그림 1)의 측정 오차는 측정 광원의 크기에 의한 것이 주된 것이며, 선 폭 측정에 있어서 약 18.6 nm 정도의 오차를 포함한다.

공진 투과는 1.292 μm 파장을 중심으로 $\sim 12.1 \text{ nm}$ 의 선폭(반지폭)으로 측정되었고, 공진 파장에서의 최대 투과율은 80.6 %, 최소 반사율은 18.0 %로 각각 측정 되었다. 반사율 값은 기판의 반사를 고려하지 않은 측정이다. 유전체 박막 에탈론에 수직으로 빛을 입사하도록 하기 위해서, 낮은 배율의 대물렌즈($\times 4$)를 이용하고 구경(stop)을 줄여 집속 광을 최소화하였다.^[5] 기판 반사를 고려하면, 공진 파장에서 흡수나 산란에 의한 손실은 불과 5.4 % 정도로 측정된다. 제작된 에탈론은 위치에 따른 두께 변화를 포함하고 있어서, (그림 3)에서와 같이 공진 파장의 이동이 측정된다. 그러나, 위치에 따른 반사율 및 투과율 값의 변화 보다 흡수의 분산에 의한

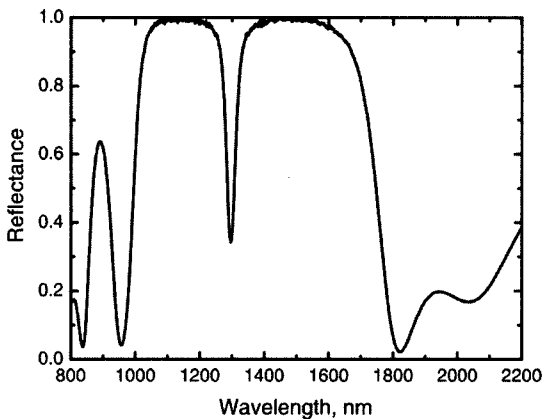


그림 1. Al_2O_3 와 a-Si 박막 반사경을 이용한 에탈론의 넓은 파장 영역에서 측정된 반사율 스펙트럼.

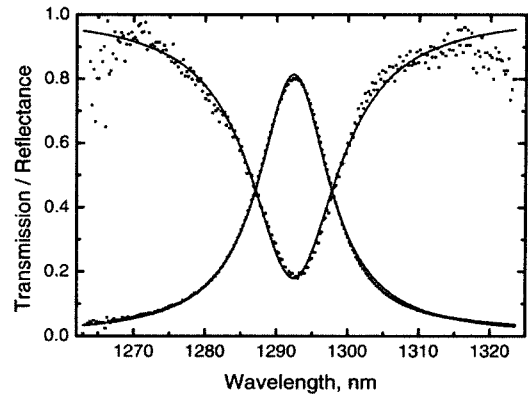


그림 2. 공진 파장 근처에서 측정된 투과율과 반사율 스펙트럼(■)과 적합화한 로렌쯔안(Lorentzian) 곡선(실선).

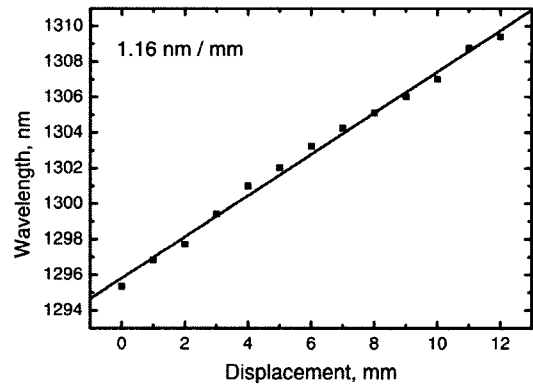


그림 3. 전자선 증착기로 증착된 에탈론의 위치에 따른 공진 중심 파장의 변화.

영향이 오히려 크게 보인다.

고전 분산 모델로 Al_2O_3 박막의 타원분광기 측정치 대 이론치의 오차(χ^2)는 0.76 정도로 잘 분석 되었으며, 1.3 μm 파장에서 굴절률 1.614를 얻었다. a-Si 박막의 측정치 대 이론치의 오차(χ^2)는 3.84이다.(그림 4) 타원분광기법으로 측정된 Al_2O_3 박막의 광학상수와 이상의 에탈론 측정 결과를 기반으로 a-Si 박막의 굴절률 실수부와 허수부는 각각 3.120와 0.002로 계산된다. 유전체 박막 에탈론의 반사율 및 투과율은 평면파 반사(plane wave reflection)를 고려하고, 전달 행렬 방법(transfer matrix method)을 사용하여 계산되었다.^[6] 추출된 광학 상수를 이용하여 공진 파장에서의 위상 분산(phase dispersion) 값을 계산하고, 측정된 공진 투과의 선 폭 값으로부터 제작된 파브리-페로 에탈론의 피네세(finesse)가 약 53 임을 알았다.

타원분광기법으로 측정된 단일 a-Si 박막의 분석에 있어서 부분적으로 공기층 및 결정성 규소(c-Si)를 포함하도록 하였을 때 이론치가 더 잘 실험 치에 근접한다. 박막 내의 공기층의 존재와 부분적으로 결정성 규소(c-Si)를 포함하는 것을 유추할 수 있고, 이는 a-Si 박막의 흡수 계수가 낮아지는 원인으로 생각된다. 이러한 Al_2O_3 와 a-Si 박막 쌍을 이용하면 InP

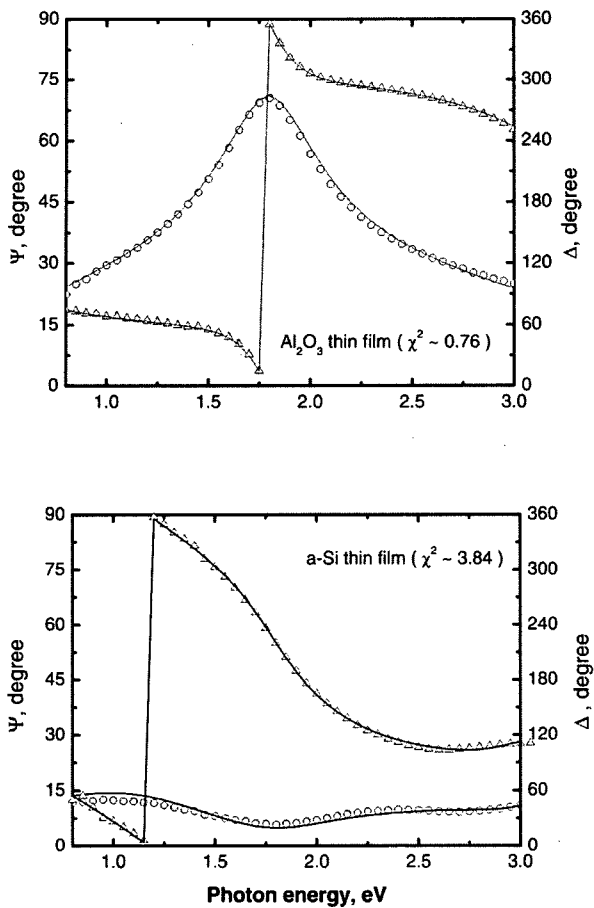


그림 4. 단일 Al₂O₃와 a-Si 박막을 각각 타원 분광기법으로 Ψ, Δ 각을 측정된 값(Δ, ○)과 고전 분산 모델로 적합화(fitting)하여 얻은 곡선(실선).

반도체에 증착되었을 때 4쌍의 경우 99.2%, 5쌍의 경우 99.7% 최대 반사율을 얻을 수 있다. 이 값은 1.3 μm 표면방출 레이저의 출력 반사경으로 충분한 반사율 값이다. 또한, 150 °C의 기판 온도에서 증착되므로 일반적인 포토리소그래피 방법으로 1.3 μm 표면방출레이저 소자 공정에 적용이 가능하다.

IV. 결 론

근거리 통신용 1.3 μm 파장 대역에서의 Al₂O₃와 a-Si 박막 쌍의 반사경으로서의 가능성을 기능하고자 이 박막 쌍을 이용한 유전체 박막 에탈론을 제작하고 측정하였다. 타원분광 기법으로 각 단일 박막을 분석하였고, 제작한 Al₂O₃와 a-Si 박막 에탈론의 공진 투과 스펙트럼을 측정하여 그 선폴이 ~ 12.1 nm임을 알았다. a-Si 박막의 이 파장 대역에서의 흡수 계수는 0.002 정도로 계산되어 매우 낮음을 알 수 있었다. 이러한 Al₂O₃와 a-Si 박막 쌍을 이용하면 InP 반도체에 증착되었을 때 4쌍의 경우 99.2%, 5쌍의 경우 99.7% 최대 반사율을 얻을 수 있다. 이는 1.3 μm 표면방출레이저의 출력 반사경으로 충분한 반사율 값이다.

참고문헌

- [1] H. W. Song, W. S. Han, J.-H. Kim, O.-K. Kwon, Y.-G. Ju, J.-H. Lee, S.-H. KoPark and S.-G. Kang, "1.55 μm bottom-emitting InAlGaAs VCSELs with Al₂O₃/a-Si thin-film pairs as top mirror," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 14, pp. 868-869, 2004.
- [2] M. H. Brodsky, R. S. Title, K. Weiser, and G. D. Pettit, "Structural, Optical, and Electrical Properties of Amorphous Silicon Films," *Phys. Rev. B*, vol. 1, no. 6, pp 2632-2641, 1970.
- [3] H. Piller, *Handbook of optical constants of solids* (Academic Press Inc., Florida, USA, 1985), pp. 571-586.
- [4] N. Nishiyama, C. Caneau, B. Hall, G. Guryanov, M. Hu, X. Liu, R. Bhat and C. Zah, "Temperature, modulation and reliability characteristics of 1.3 μm-VCSELs on InP with AlGaInAs/InP lattice matched DBR," in *IEEE 19th International Semiconductor Laser Conference '04, IEEE, Piscataway, NJ, USA*, pp. 115 - 116, 2004.
- [5] H.-E. Shin, Y.-G. Ju, H.-W. Song, D.-S. Song, I.-Y. Han, J.-H. Ser, H.-Y. Ryu, and Y.-H. Lee, "High-finesse Al_xO_y/AlGaAs non-absorbing optical cavity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 18, pp. 2205-2207, 1998.
- [6] 황보 창권, 박막 광학 (다성 출판사, 서울, 2001), pp. 47-52.

1.3 μm Waveband Al₂O₃/a-Si Thin-Film Etalon and Measurements of Optical Constants

H.-W. Song[†], J.-H. Kim and W. S. Han

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Basic Research Laboratory
161, Kajong-Dong, Yusong-Gu, Daejeon, 305-350, KOREA*

[†]E-mail: hwsong@etri.re.kr

(Received July 21, 2005, Revised manuscript October 7, 2005)

We have fabricated a Fabry-Perot etalon around 1.3 μm wavelength utilizing Al₂O₃ and a-Si thin films. A full width at half maximum of ~12.1 nm and a finesse value of 53 were found from the measured resonant transmission spectra. Single thin film of Al₂O₃ was analyzed by spectroscopic ellipsometry. A refractive index of a-Si thin film was measured as 3.120 in the real part and 0.002 in the imaginary part, respectively. The thin-film pairs of Al₂O₃ and a-Si are applicable to output mirrors of vertical-cavity surface-emitting lasers at 1.3 μm waveband.

OCIS Codes : 310.0310, 310.1620, 310.6860, 230.4040, 250.7260.