

## RF 스퍼터링방법에 의한 제2고조파소자의 광학박막 제작

김용훈 · 이성국 · 마동준 · 한재용 · 박성수 · 이상학

삼성종합기술원 신소재응용연구소

### Optical Coating for SHG device by RF Sputtering Method

Y.H. KIM, S.K. LEE, D.J. MA, J.Y. HAN, S.S. PARK and S.H. LEE

Display Lab., Materials & Device Research Center,

Samsung Advanced Institute of Technology, Nongseo-Ri,

Kiheung-Eup, Yongin-Gun, Kyungki-Do, 449-900

초 록 공진기형 제2고조파소자(SHG)는 레이저 빔의 에너지 밀도가 높아 고내구성 박막이 필요하다. 본 연구에서는 광학박막 재료로 고융점 산화물인  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ 를 사용하였다. 반응성 스퍼터링 방법으로 제작한  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  박막을 XRD, SAM을 사용하여 분석하였고, 박막의 광학적 특성을 평가하였다. SHG 소자의 KTP 및 Nd:YAG 결정의 반사방지막(A/R 코팅) 구성은  $ZrO_2$ 와  $SiO_2$ 를 사용하여 컴퓨터로 계산하였는데 기본파인 1064nm와 제2고조파인 532nm에서 각각 0.1%, 0.5% 이하의 반사율을 갖도록 하였다. 또한 고반사막(H/R 코팅)의 경우 1064nm에서 99.9%의 반사율을 갖도록  $TiO_2$ 와  $SiO_2$ 로 디자인하였다. 제작한 광학박막의 광학적 특성, 레이저 내구성(laser damage threshold), 온도도 안정성 실험 등을 통해 광학박막을 평가하였다.

**Abstract** Oxide films such as  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$  and  $SiO_2$  are deposited by reactive rf magnetron sputtering method in an oxygen environment for the application of optical coating of SHG device. The properties of these films are examined by XRD and SAM analysis. Antireflective coating and high reflective coating designs for KTP and Nd:YAG single crystals are calculated by computer. Reflectances are 0.1% and 0.5% at 1064nm and 532nm, respectively for A/R coating and 99.9% at 1064nm for H/R coating. Optical properties, laser damage threshold and environmental stability of coating layers are examined.

### 1. 서 론

광학박막은 박막의 윗면과 아래면 사이에서 일어나는 광의 간섭 현상을 이용하여 광량을 조절하며 광학 부품의 광학적 특성을 주어진 목적에 맞게 변화시키는 방법으로 널리 사용되고 있다. 일반적으로 광학박막은 진공챔버 내에서 증착하고자 하는 물질을 열 저항 또는 전자빔으로 녹여, 증발된 입자가 기판에서 성장하여 제작된다. 광학박막의 특성은 박막의 여러 제작 조건 즉 진공도, 기판 온도, 반응가스 압력, 증착기 내부의 기하학적 모양, 증착 물질 등에 따라 달라진다. 이러한 방법에 의해 제작한 광학박막은 bulk 형태보다 광학적, 화학적, 구조적 특성이 열악하다. 이것은 박막

의 성장이 비교적 낮은 에너지에서 이루어지기 때문에 그 결과 박막은 대부분 주상(column)구조를 갖으며 많은 void를 갖는다. 한편 이 void는 수분 흡착의 원인이 되므로 광학박막의 광학 특성을 불안정하게 하는 원인이 된다<sup>1)</sup>. 그러므로 박막의 광학 특성을 개선하려면 증착시 더 많은 에너지가 필요하다. 특히 최근의 레이저 기술의 발전, 광학 부품의 고급화 추세 및 광전자 기술 및 기기의 발전에 따라 외부 환경에 강하고 품질이 높은 특수 광학박막의 요구가 점차 증가하고 있다. 공진기형 제2고조파(SHG)소자의 경우 레이저 빔의 에너지 밀도가 높으므로 고내구성 박막이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 조건을 만족시키기 위하여 반응성 스퍼터링법에 의해

광학박막을 제작하였다. 즉 박막재료로 고융점 산화물인  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ 를 사용하였다.  $ZrO_2$ 는 0.34~12 $\mu m$  영역에서 투명하고 내구성이 강하며 굴절율이 비교적 높다. 또한 가시영역 및 IR영역에서 loss가 적고 기계적, 화학적 특성이 우수하며 레이저 damage threshold가 높은 특성을 갖고 있다<sup>2)</sup>.  $SiO_2$ 는 광투과범위가 0.2~9 $\mu m$ 로 낮은 굴절율을 갖고며 증착이 용이하고  $TiO_2$ 는 가시광선 영역에서 높은 투과율을 갖고 내구성이 우수하다<sup>3)</sup>. 스퍼터링법은 증착 원자의 에너지가 약 10~100 eV로 진공증착의 0.01~1eV보다 크므로, 고품질의 광학박막을 제작할 수 있고 증착률이 낮은 단점을 가지고 있으나 미세 두께조절이 가능한 장점을 가진다. 또한 스퍼터링에 의해 제작된 박막의 특성은 주로 타겟(target)의 품질, 타겟과 기관 온도, 증착률, 가스의 순도 및 압력, 기관의 전위, 진공상태 및 기하학적 배치등 증착 조건에 따라 변화한다<sup>4)</sup>.

## 2. 이 론

광이 다른 매질 경계면을 통과할 때 반사가 일어나는 이유는 그 경계 면에서 굴절율이 불연속적이기 때문이다. 굴절율이 서로 다른( $n_0$ 와  $n_1$ ) 두 가지 매질의 경계면에 광을 수직으로 입사하면 그 경계면에서의 분광반사율은 식(1)과 같다<sup>5)</sup>.

$$R = \left\{ \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right\}^2 \quad (1)$$

다층 광학박막에서 막의 굴절율, 광학적 두께 및 위상각이 입사 매질 쪽에서 기관 쪽으로 각각  $n_1, n_2, \dots, n_i, d_1, n_2, d_2, \dots$ , 및  $\delta_1, \delta_2, \dots$  이고, 입사 매질과 기관의 굴절율을 각각  $n_0, n_s$ , 반사방지 설계 중심파장을  $\lambda_0$ , 기관과 매질에서 흡수와 파장에 의한 굴절율 분산은 없다고 가정할 때 반사방지막 구성 이론은 다음과 같다. 반사방지막 중 가장 간단한 단층 반사방지막의 경우 광이 입사 매질에서 각도  $\theta_0$ 으로 입사하면 그 진폭반사계수 R과 진폭투과계수 T는 식(2), (3)과 같다<sup>6)</sup>.

$$R = \frac{r_{01} + r_{1s} \exp(-\iota 2\delta_1)}{1 + r_{1s} r_{01} \exp(-\iota 2\delta_1)} \quad (2)$$

$$T = \frac{t_{01} t_{1s} \exp(-\iota 2\delta_1)}{1 + r_{1s} r_{01} \exp(-\iota 2\delta_1)} \quad (3)$$

여기서  $t+r=1$ ,  $r_{01}=(N_0-N_1)/(N_0+N_1)$ ,  $r_{1s}=(N_1-N_s)/(N_1+N_s)$ 이며, S편광과 P편광에 대해  $N_i$ 는 각각  $n_i \cos \theta_i$ ,  $\cos \theta_i/n_i$ 이다. 또한 위상각  $\delta_i=2\pi n_i d_i \cos \theta_i/\lambda$ 이다. 분광반사율 R과 분광투과율 T는  $R=|R|^2$ ,  $T=(N_s/N_0)|T|^2$ 이다. 광이 수직으로 입사하는 경우( $\theta_0=0^\circ$ ), 이 단층막의 두께  $d_i$ 는  $d_i=(2m-1)\pi/2$ ,  $m=1, 2, \dots$ 이고  $n_i d_i=(2m-1)\lambda_0/4$ 로되는 경우, 이 막을 물질의 굴절율이  $n_0 < n_i < n_s$ 를 만족하면  $n_i=(n_0 n_s)^{1/2}$ 의 조건으로 반사율은 0이 된다. 한편 기관 물질의 굴절율 및 원하는 반사 방지 영역의 설정에 따라 적층하는 광학박막의 수 및 두께를 변화시킨 다층박막이 필요하다.

KTP 단결정을 레이저 공진기 내부에 이용할 때 반사방지막이 없는 경우 약 8%의 광이 표면에서 반사하므로 이 반사 손실에 의해 제2고조파 변환효율이 저하된다. 제2고조파 변환효율을 높이려면 입사 레이저광의 강도를 크게 하고 기본파와 제2고조파 파장에 대해 굴절율을 일치시키는 위상정합조건을 만족시킬 필요가 있다. KTP 결정의 위상정합조건은 아래 식들과 같은데 KTP 단결정의 X-Y면에서 각도에 따른 굴절율과 z축의 굴절율 관계는 식(4)를 만족한다<sup>7)</sup>.

$$n(\phi) = \frac{n_x n_y}{(n_x^2 \cos^2 \phi + n_y^2 \sin^2 \phi)^{1/2}}, \quad n = n_z \quad (4)$$

$$n^{2w}(\phi) = \frac{(n^w(\phi) + n^{wz})}{2} \quad (5)$$

$$\frac{\cos^2 \theta}{n_z^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n^2(\phi)} = \frac{1}{n_A^2} \quad (6)$$

여기서  $\theta$ 는 polar angle,  $\phi$ 는 x축으로부터의 각도,  $n_x, n_y, n_z, n_A$ 는 각 축 및 위상정합각에서의 굴절율이다. 파장이 1064nm인 Nd:YAG 레이저를 KTP 단결정에 입사시 위상정합각은 위의 식과 KTP 단결정의 파장 및 방위별 굴절율인 Table 1에 의해  $\theta=90^\circ$ ,  $\phi=23.61^\circ$ 이다. 한편  $\theta=90^\circ$ ,  $\phi=23.61^\circ$ 인 KTP 단결정면에 z축에서 45° 편광방향을 갖는 기본파가 입사시 1064nm와 532nm에서  $n_{(23.5^\circ)}^w = 1.744$ ,  $n_{(23.5^\circ)}^w = 1.787$ 이며 이 값을 이용하여 KTP 단결정의 A/R코팅막과 H/R막코팅을 설계하였다.

Table 1. Refractive index of KTP single crystal.

refractive index wavelength	$n_x$	$n_y$	$n_z$
1064nm	1.7377	1.7453	1.8297
532nm	1.7780	1.7886	1.8887

본 연구에서는 rf 마그네트론 반응성 스퍼터링법에 의해 산화물 광학박막을 제작하여 각 박막의 물리적, 광학적 특성을 측정하였고 제2고조파소자에 적용하여 제이저 내구성, 온습도 안정성 실험을 통해 광학박막을 평가하였다.

### 3. 실험 방법

#### 광학박막의 제작

본 연구에서 광학박막으로 사용한  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  박막은 BALZERS사의 up-type sputter(LA440S)를 사용하여 rf 마그네트론 반응성 스퍼터링법으로 증착하였다. 장비의 대략적인 구성은 Fig. 1과 같다. 사용한 타겟은 125mm 직경이며 Zr, Ti,  $SiO_2$  타겟의 순도는 각각 99%, 99.9%, 99.9%이고, 타겟과 기판 사이의 거리는 50mm이다. 스퍼터링의 적정 가스비는 Ar 가스의 양을 40~100sccm(standard cubic centimeter per minute), 산소를 2~10sccm으로 변화시켜 최적 조건을 선택하였으며, 스퍼터링시 기판을 4rpm의 속도로 회전시키며 막 두께의 균일도를 향상시켰다. 증착에 사용한 rf 전력은 100~400W 범위이었다. 반응성 스퍼터링에 사용한 Ar 및  $O_2$  가스는 순도 6N의 고순도이었다. 각 박막 제작은 p-type의 (111) 방향을 갖는 3" 직경의 Si 기판 및 Corning glass 기판을 사용하였다. 스퍼터링 시작전의 초기 진공도는 약  $5 \times 10^{-7}$  mbar이었고 가스 주입후 약 5분간 presputtering을 실시하였다. 그리고 각 박막의 스퍼터링은 기판 가열 없이 상온 증착으로 하였다. 각 박막의 스퍼터링 조건은 Table 2와 같다.

증착한 박막의 결정구조는 XRD를 사용하여 분석하였으며 SAM과 SEM 분석을 실시하였다. 한편 각 박막의 두께 및 굴절을 값은 ellipsometry를 사용하여 측정하였다. 반응성 스퍼터링법에 의해 증착한 각 박막의 표면거

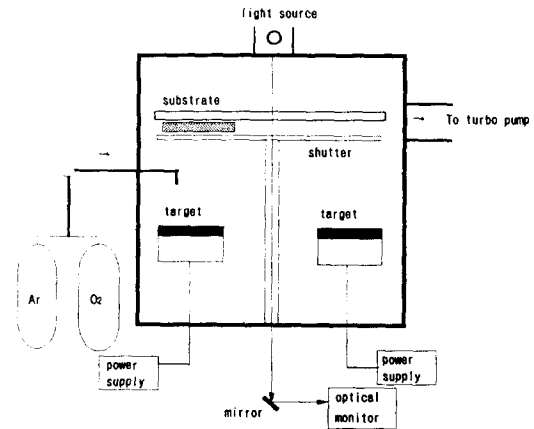


Fig. 1. Schematic illustration of the sputter system.

칠기(surface roughness)를 Nanosurf 장비를 사용하여 측정하였다. 각 단결정에 코팅한 반사방지막과 고반사막의 반사율 측정은 spectrophotometer(UV/VIS SPECTROPHOTOMETER, HITACHI U4001)를 사용하였으며 YAG 레이저를 사용하여 박막의 레이저 내구성을 실험하였고 흡습성 안정 실험을 실시하였다.

#### A/R, H/R 박막 제작

본 연구에서 제작한 공진기형 제2고조파소자의 공진기 개략도는 Fig. 2와 같다. 여기서 LD는 809nm의 파장과 500mW의 출력을 갖는 레이저다이오드이며 레이저 광은 collimating lens(C/L)를 통과하여 Nd:YAG 결정으로 입사되고, 결정내에서 여기되어 1064nm 파장이 된다. Brewster plate(B/P)를 지나 KTP 결정으로 들어온 광은 532nm로 변환되어 output mirror(O/M)와 beam splitter(B/S)를 통과한다. 제2고조파소자의 기본파 파장이 1064nm이고 SHG 파장이 532nm이므로 KTP 단결정의 각 면에 1064nm 및 532nm 파장에 대해 반사방지막을 갖도록 하고 YAG 결정은 1064nm 파장에 대해 고반사막을 갖도록 설

Table 2. RF reactive sputtering conditions for ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> films.

Condition \ Target	Zr	Ti	SiO <sub>2</sub>
Ar gas(sccm)	50	30	40
O <sub>2</sub> gas(sccm)	6	8	6
Base pressure(mbar)	$<5.0 \times 10^{-7}$	$<5.0 \times 10^{-7}$	$<5.0 \times 10^{-7}$
Sputtering pressure(mbar)	$8.0 \times 10^{-3}$	$7.3 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-3}$
RF power(W)	400	300	200
Substrate temp.(°C)	RT	RT	RT

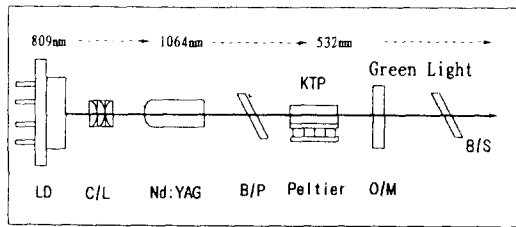


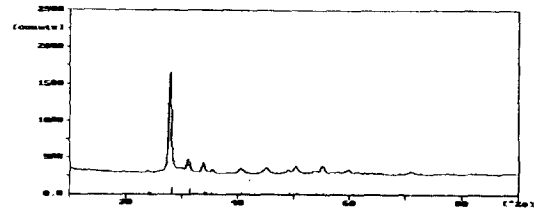
Fig. 2. Schematic diagram of intracavity type SHG device.

계하였다. 즉 KTP 단결정에 있어 1064nm와 532nm의 파장에서 각각 0.1% 및 0.5% 이하의 반사율을 갖도록 하고, YAG 단결정에서는 1064nm 파장에서 99.9%의 반사율을 갖도록 광학 박막을 컴퓨터를 사용하여 계산하였다. KTP 결정에 있어 설계중심 파장이 550nm일 때 각 박막의 광학두께를 사용한 디자인은 KTP/0.156L 0.105H 0.108L 0.311H 0.145L 0.110H 0.370L/공기이며, 여기서 H는 굴절율 2.2인 ZrO<sub>2</sub> 박막, L은 굴절율 1.47인 SiO<sub>2</sub> 박막이다. 또한 설계중심파장이 1064nm일 때 YAG 결정의 H/R 코팅 디자인은 YAG/(0.25L 0.25H)12 0.125L/ 공기이며, 이때 H는 굴절율 2.3인 TiO<sub>2</sub> 박막, L은 굴절율 1.47인 SiO<sub>2</sub> 박막이다.

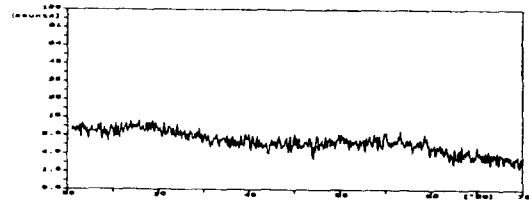
#### 4. 결과 및 고찰

##### 증착 박막의 분석

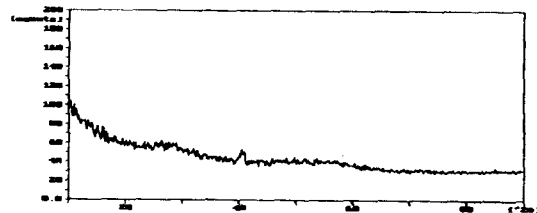
반응성 스퍼터링에 의해 증착한 SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 박막은 Fig. 3과 같이 XRD 분석에 의해 SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>의 경우는 비정질막으로 성장하였고 ZrO<sub>2</sub>는 배향면이 (111)로 결정화되었음을 알 수 있다. ZrO<sub>2</sub> 박막에 있어 스퍼터링시 반응



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> films.

산소량에 따른 XRD 분석 결과는 Fig. 4와 같으며 산소 flow rate가 2sccm 미만인 경우 ZrO<sub>2</sub> 막은 형성되지 않고 Zr 금속막이 형성되었으며, 그 이상의 경우 2θ가 약 28°에서 ZrO<sub>2</sub> 피크가 존재하기 때문에 ZrO<sub>2</sub>막이 형성됨을 알 수 있다. 또한 이때 형성된 ZrO<sub>2</sub> 막

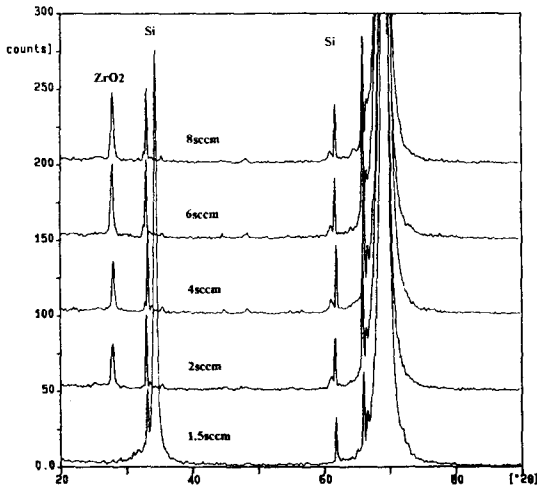


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of  $ZrO_2$  film according to  $O_2$  flow rate.

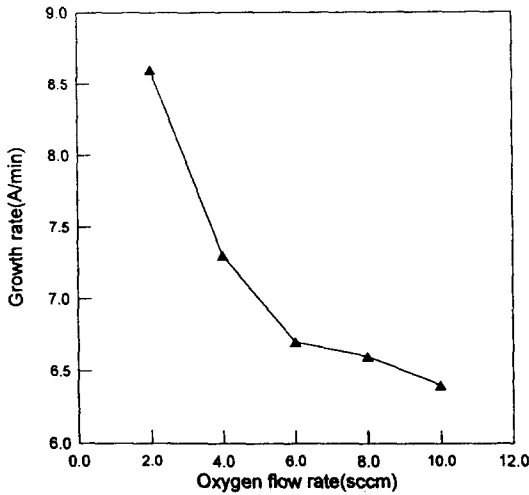


Fig. 5. Growth rate of sputtered  $ZrO_2$  film according to  $O_2$  flow rate.

은 monoclinic 구조를 이루고 있었다. Fig. 5, 6 과 같이 산소의 flow rate가 증가할수록 박막의 성장 속도는 감소하였으며 굴절율은 증가하였다. Fig. 7은  $ZrO_2$  박막의 SAM분석 data로, (a)는 초기 표면에서의 조성을 나타내고 (b)는 1분 Ar sputtering 후  $ZrO_2$  표면에서의 조성을 보인다. Fig. 7의 (a)에서 C 피크는 대기중의 탄소가 박막 표면에 달라붙은 것으로 생각되며 표면을 1분간 스퍼터링한 후 없어졌다. 이때  $ZrO_2$  박막 내 다른 불순물을 관찰되지 않았다. 한편 Fig. 8은  $ZrO_2$  박막을 8.5

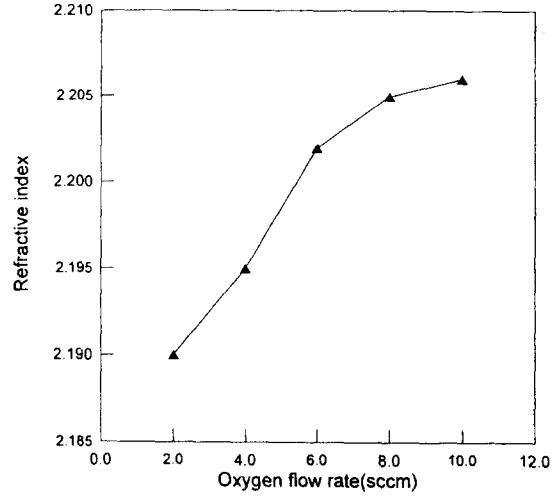


Fig. 6. Refractive index of sputtered  $ZrO_2$  film as a function of  $O_2$  content in sputtering gas (Ar 50sccm).

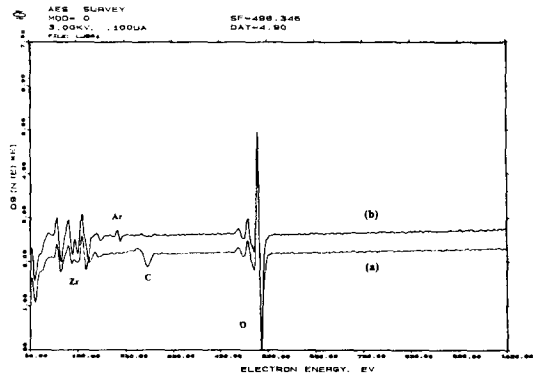


Fig. 7. Auger spectra of  $ZrO_2$  film. (a) initial surface (b) after 1 minute Ar sputtering

분간 스퍼터링 시키면서 막의 depth profile을 측정 한 결과로,  $ZrO_2$ 가 일정한 조성비로 되어 있음을 산소 및 Zr의 피크 변화로 알 수 있다.

$TiO_2$  박막은 일반적으로 다른 박막에 비해 증착 조건에 따라 그 특성이 많이 변하는 단점을 갖고 있다. 즉,  $TiO_2$  박막의 굴절율은 파장에 따라 변하며 같은 파장에서도 박막의 두께 및 성장조건에 따라 변한다. Fig. 9는 산소 flow rate에 따른  $TiO_2$  박막의 굴절율 변화이다. Ar가스의 양을 50sccm으로 일정하게 고정시키고 산소의 양을 4에서 12sccm으로 변화시키며 같은 조건으로  $TiO_2$ 막을 증착 하였는데 산소 flow가 증가할수록 박막의 굴절율은 증가하였다.

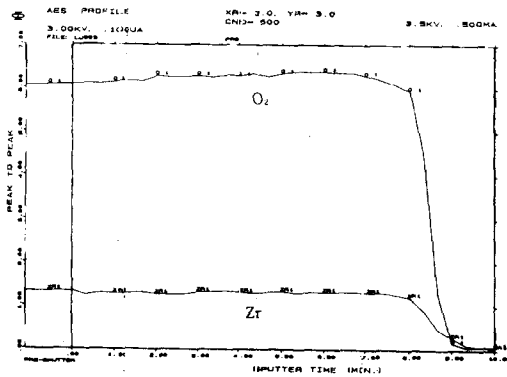


Fig. 8. Auger depth profile(peak-to-peak) of  $ZrO_2$  film.

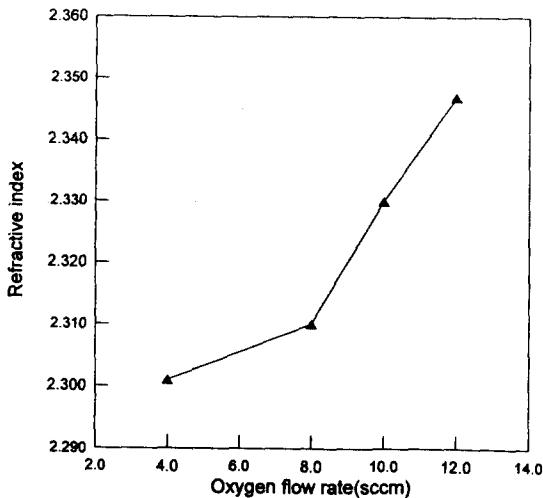


Fig. 9. Refractive index of sputtered  $TiO_2$  film as a function of  $O_2$  content in sputtering gas (Ar 30sccm).

Fig. 10은 Si 기판과  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ 를 증착한 후 박막의 표면거칠기를 Nanosurf를 사용하여 측정된 것이다. 일반적으로 표면거칠기가 큰 박막이 표면거칠기가 작은 박막보다 막의 표면에서 산란이 더 많이 생겨 박막의 반사율을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. Si 기판과 각 박막의 평균높이거칠기(Ra) 측정은  $100\mu m$  scan 범위에서 실시하였다. Bare Si 기판의 Ra 값은 약 15nm이며  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$  막은 각각 10, 8, 10nm이었다.

KTP, YAG 결정의 A/R, H/R막

Fig. 11은 KTP 및 YAG 단결정에 A/R 및 H/R 막을 디자인한 결과로, 400에서 1200nm 파장변화에 따른 반사율 변화를 보이고 있다.

KTP의 경우 532nm와 1064nm에서의 A/R막의 반사율 변화는 각각 0.5%, 0.1%이며, YAG의 경우 1064nm에서의 H/R막의 반사율은 99.9%이다. 제작한 A/R, H/R 코팅의 반사율을 spectrophotometer를 사용하여 측정하였고 그 결과는 Fig. 11에서 점선으로 나타냈다. A/R 코팅의 경우 532nm와 1064nm에서 각각 0.2%, 0.1%의 반사율을 갖고 H/R 코팅의 경우는 1064nm에서 99.9%의 반사율을 갖는다. Fig. 12는 H/R 코팅막을 증착 시킨 YAG 단결정 단면의 FE-SEM 사진이다. 사진의 아래 부분이 YAG 결정이며 그 위로  $SiO_2$ 와  $TiO_2$  층이 교대로 25층 적층되어 있으며 각 박막의 두께는 디자인 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다. 사진에서 굴절율이 큰  $TiO_2$ 층은 밝게 보이고 굴절율이 작은  $SiO_2$ 층은 어둡게 나타나 있다.

광학박막의 레이저 내구성 측정<sup>8,9)</sup>

KTP, YAG 결정에 A/R, H/R막을 제작한 후 박막의 레이저 내구성(laser damage threshold) 측정은 Fig. 13과 같은 구성에 의해 실시하였다. 이때 CW 50W 출력의 YAG 레이저를 damage threshold 측정에 사용하였다. 한편 레이저 power 밀도를 증가시키기 위해 렌즈를 사용하였다. 사용한 렌즈는 초점거리 f가 100mm로 레이저 빔을 Gaussian 형태로 가정하고 spot size를 계산하면 빔의 직경이 약  $300\mu m$ 임을 알 수 있었다. 이때 YAG 레이저의 초기 빔 직경은 6mm이고 빔 divergence가 11mrad이므로 단위면적당 1064nm power density는 약  $70MW/cm^2$ 이었다. 이 레이저 빔을 광학박막 표면에 180분간 조사시킨 후 코팅막을 육안 및 현미경으로 관찰하였고 레이저 조사후 광학박막의 반사율을 측정하였다. 그 결과 레이저 조사 후 박막의 변화를 관찰할 수 없었으며 레이저 damage threshold는  $70MW/cm^2$  이상임을 알 수 있었다. 또한 레이저 조사후 광학박막의 반사율에도 변화가 없었다.

광학박막의 신뢰성 시험

광학박막의 신뢰성 시험으로 일반적으로 널리 알려진 것은 미국의 MIL 규격중 광학부품에 대한 규격이 있다. MIL규격에는 여러 가지 규격이 있으며 시험항목으로는 온습도시험

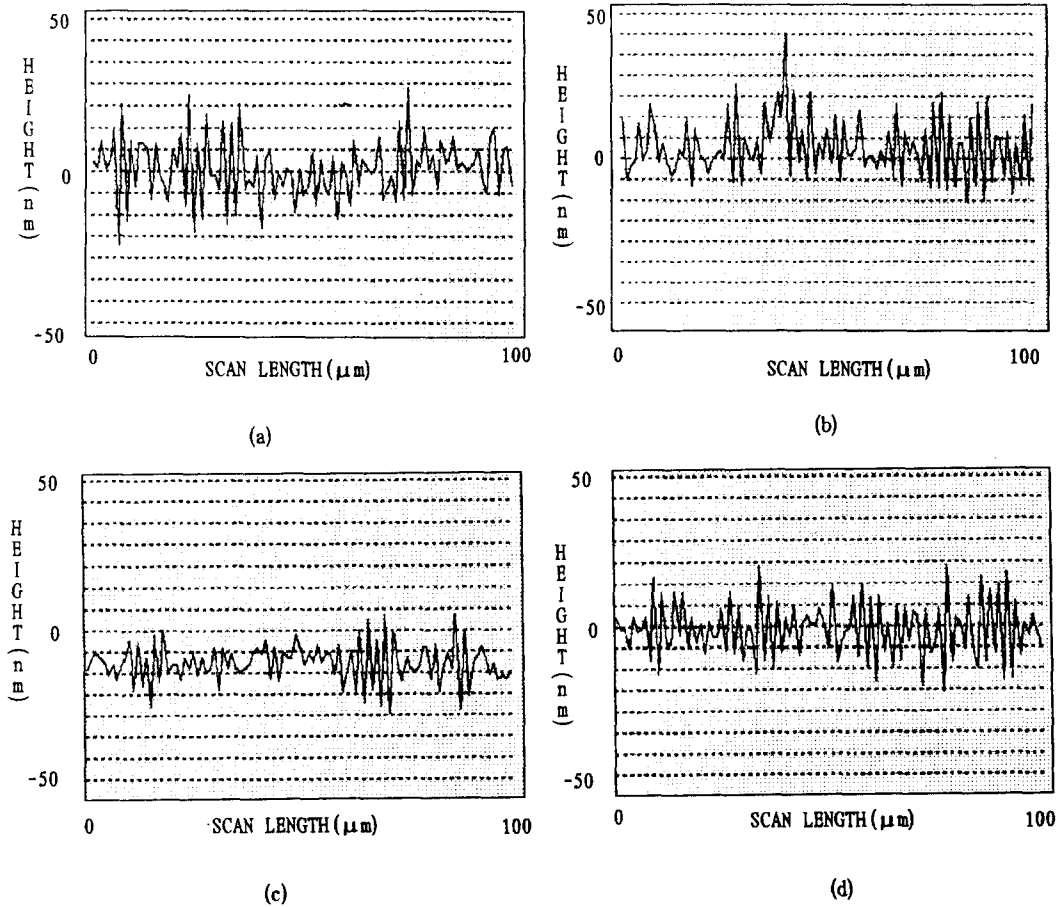


Fig. 10. Surface profiles for uncoated Si wafer and sputtered  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  films.

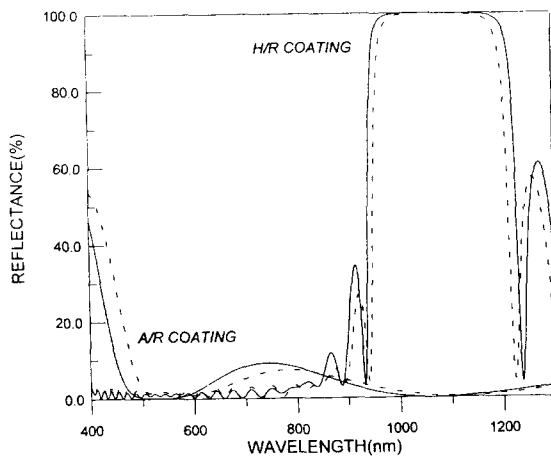


Fig. 11. Designed and measured reflectance of A/R and H/R coating. (solid line: calculated data, dotted line: measured data)

이 있다<sup>10)</sup>. 광학박막의 신뢰성 시험을 위해 MIL규격(MIL-M-13508C, MIL-C-675C)에 따라 온습도 시험을 실시하였다. 즉 시편을 온도  $48 \pm 3^\circ\text{C}$ , 습도 95~100%인 항온항습조에서 24시간 유지시킨 후, 유기용제로 닦고, 백색광 램프 아래서 반사광에 의해 육안 검사하였다. Crack 등의 물리적 결함이 존재하는지를 확인하기 위하여 현미경 관찰을 실시하였으나 결함을 관찰할 수 없었다. 또한 A/R, H/R 코팅막의 반사율을 측정하였으나 반사율 변화는 없었다.

## 5. 결 론

공진기형 제2고조파소자에서 반사에 의한 광손실을 줄이기 위한 광학박막을 제작하였다. KTP 및 Nd:YAG 단결정에 대한 A/R, H/R막 제작은 고용점 광학박막인  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ 를 사용하였으며 KTP 결정의 경우 설계중심파장

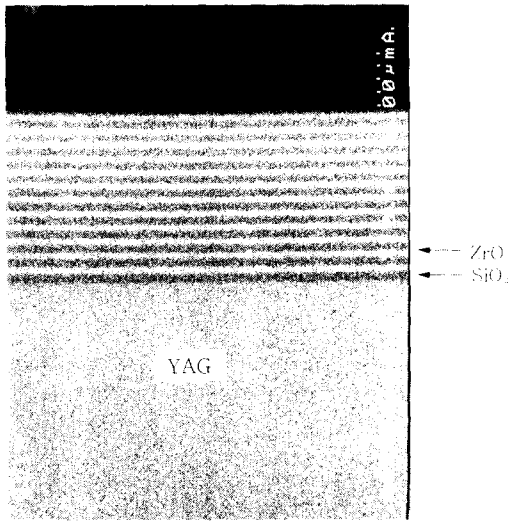


Fig.12. SEM micrograph of the fracture face of H/R coated YAG substrate(X100K).

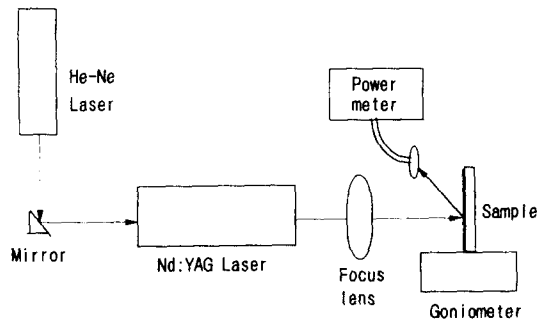


Fig. 13. Block diagram for measuring laser-induced damage threshold of optical coating.

이 550nm일 때 KTP/0.156L 0.105H 0.108L 0.311H 0.145L 0.110H 0.370L/공기인 구조를 갖으며, 여기서 H는 굴절율 2.2인  $ZrO_2$  박막, L은 굴절율 1.47인  $SiO_2$  박막이다. 또한 설계중심파장이 1064nm일 때 YAG 결정의 H/R 코팅 디자인은 YAG/(0.25L 0.25H)12 0.125L/공기이며 이때 H는 굴절율 2.3인  $TiO_2$  박막, L

은 굴절율 1.47인  $SiO_2$  박막이다. 이와 같은 층구조로 반응성 스퍼터링법에 의해 제작한 A/R코팅막의 반사율은 532nm와 1064nm에서 각각 0.2%, 0.1%이며 H/R코팅막은 1064nm에서 99.9%로 매우 우수하였다. 또한 코팅막의 레이저 damage threshold는  $70MW/cm^2$ 이상이므로 본 연구에서 제작한 SHG 레이저 power density보다 높아 광손상을 입지 않았다. 항온항습조를 사용한 온습도 실험 후에도 코팅막의 반사율 변화가 없었다.

### 참 고 문 헌

1. Samad M. Edlou, Ali Smajkiewicz and Ghanim A. Al-Jumaily, Applied Optics, 32 (28), 5601 (1993)
2. Michael A. Russak and Christopher V. Jahnes, J. Vac. Sci. Technol. A 7(3), 1248 (1989)
3. Z. L. Wu and K. Bange, Applied Optics, 33 (34), 7901 (1994)
4. 삼성첨단기술연구소, 광학가공 및 응용, pp92, 경기도 용인 (1993)
5. H.A.Macleod, Thin film optical filters, 2nd edition, pp. 18, Adam Hilger Ltd., (1986)
6. Thin film and their applications in opto-electronics, Ch. 1, pp.242, Optronics, Japan (1993)
7. Katusuyuki Asaumi, Optronics, 4, 179 (1992)
8. Thin film and their applications in opto-electronics, Ch. 1, pp.150, Optronics, Japan (1993)
9. K. H. Guenther, Applied Optics, 23(21), 3743 (1984)
10. Thin film and their applications in opto-electronics, Ch. 1, pp.160, Optronics, Japan (1993)