

A/R 코팅 변화에 따른 200MHz AOM의 laser damage threshold 증가

김용훈 · 이항우 · 이진호 · 박영준 · 박정호

삼성종합기술원 표시재료 Lab.

Laser Damage Threshold Increase of A/R Coating Films for 200MHz AOM

Y.H. Kim, H.W. Lee, J.H. Lee, Y.J. Park and J.H. Park

Display Materials Lab, Samsung Advanced Institute of Technology, Nongseo-Ri, Kiheung-eup, Yongin-Gun, Kyungki-Do, 449-900

(1996년 10월 14일 받음, 1997년 1월 25일 최종수정본 받음)

초 록 200MHz 음향광변조기(AOM : Acousto-Optic Modulator)는 제2고조파(SHG : Second Harmonic Generation) 녹색 레이저와 함께 DVDR(Digital Video Disk Recorder)에 적용되어 고밀도 광기록용으로 사용되었다. 이러한 고밀도 광기록 장치로써 사용되기 위해서는 고출력 레이저의 사용이 필수적이며, 레이저 빔이 통과하는 각 광학 소자들의 코팅막은 고출력 레이저 빔에 대해 높은 레이저 damage threshold를 가져야 한다. AOM의 음향광학재료로 사용되는 TeO_2 단결정에 코팅막의 종류 및 증착 조건을 변화시키며 E-beam 증착법으로 A/R 코팅 시편을 준비하였다. 0.55W의 입력 power를 갖는 Ar 레이저를 사용하여 코팅막의 광손상 정도를 확인하였다. Al_2O_3 막에 비해 ZrO_2 와 SiO_2 막을 사용한 경우 레이저 damage threshold는 크게 향상되었다. 또한 AOM 모듈을 제작 후 구동회로와 연결하여 약 20mW의 SHG power를 입력시키며 출력 power의 long term 안정성을 측정하였다.

Abstract AOM(Acousto-optic modulator) with 200MHz frequency and SHG(Second harmonic generation) green laser with 532 nm wavelength were used for DVDR(Digital video disk recorder). For the applicatin of high density optical recording, a high power laser is required for the system and optical coating layers of each optical device must have a high laser damage threshold. We made anti-reflective coatings on a TeO_2 single crystal, which is used as an acousto-optic material, by E-beam evaporation method. Laser damage threshold was measured by Ar laser with the input power of 0.55W. Laser damage threshold of ZrO_2 and SiO_2 films were higher than Al_2O_3 film. We also investigated a long-term stability of the output power of SHG green laser.

1. 서 론

음향광학효과는 초음파와 광의 상호 작용에 의해 매질의 광학 특성이 변하는 현상으로 이 중 가장 많이 이용되는 현상은 광의 회절이다. 즉 어떠한 매질 내로 초음파와 광이 입사되어 지나갈 때 적절한 조건이 만족되면 입사된 광이 부분적으로 다른 방향으로 회절되고 동시에 광의 주파수가 초음파 주파수만큼 변조된다¹⁾. 음향광학현상을 이용한 대표적인 소자는 음향광변조기(AOM : Acousto-optic modulator)로서 레이저 공진기 내부에 설치되어 Q-switch 또는 CW mode-lock 레이저와 같은 짧은 펄스 발진에 사용되고 있다. 펄스레이저 응용 외에도 CW 레이저 외부에 설치하여 광신호 발생 및 처리 응용에도 유용하게 쓰이고 있다.

AOM은 최근 제2고조파 녹색레이저를 사용한 Digital video disk recorder(DVDR)에 적용되어 고밀도 광 기록을 실현시킴으로써 광변조기로서의 성능 및 실용가치를 높였다²⁾. 광변조기용 AOM의 바람직한 특성은 높은 1차 회절효율과 짧은 회절스위칭 시간의 동시 만족이라 할 수 있다. AOM의 성능은 두 가지 측면에서 결정된다. 첫째는 음향광학 재료의 고유 특성으로 높은 음향광학 회절성능지수

를 갖는 재료의 선택이며, 둘째는 초음파의 주파수 및 초음파를 발진시키는 transducer의 설계 및 제작이다³⁾. 본 연구에서는 높은 음향광학 회절성능지수를 갖는 TeO_2 단결정을 사용하여 200MHz용 AOM을 제작하였다. DVDR 시스템에 적용된 AOM의 경우 약 20mW 정도의 power를 갖는 532nm광장의 SHG 레이저를 TeO_2 표면에 입사시킨다. 레이저 광이 통과하는 TeO_2 의 양면은 A/R(Anti-reflective)코팅을 실시하여 광의 손실을 막고 효율을 높여준다. Al_2O_3 를 사용하여 A/R 코팅을 실시한 AOM의 경우 장시간 사용시 A/R 코팅막의 열화에 따른 레이저 power drop 현상이 나타났고 본 연구에서는 A/R 코팅 material을 바꾸어 power drop 현상을 개선하였다.

2. 이 론

단층 방사방지막⁴⁾

박막의 굴절율, 광학두께, 위상각을 입사 매질에서 기관 쪽으로 각각 $n_1, n_2, \dots, n_1d_1, n_2d_2, \dots, \delta_1, \delta_2, \dots$ 이라 하고, 또 입사 매질과 기관의 굴절율을 n_0, n , 반사방지 중심파장을 λ_0 라고 표시할 때, 기관 상에 단층막이 있고 광이 입사 매질에서 각도 θ_0 으로 입사하면 진폭반사계수 R과 진폭투

Table 1. Refractive index of TeO₂ single crystal

wavelength(μm)	ref. index	n _o	n _e
1.064		2.2068	2.3507
0.6328		2.2597	2.4119
0.5145		2.3111	2.4732
0.4880		2.3299	2.4958

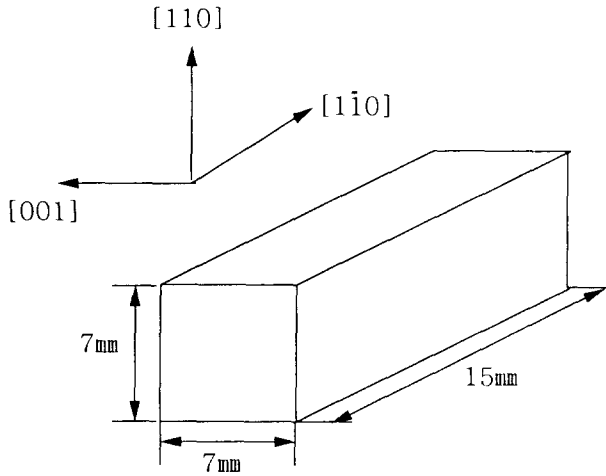


Fig. 1. Direction and size of TeO₂ single crystal

과계수 T는 식(1)과 같다.

$$R = \frac{r_{0t} + r_{1s} \exp(-i2\delta_1)}{r + r_{1s} r_{0t} \exp(-i2\delta_1)}$$

$$T = \frac{t_{0t} t_{1s} \exp(-i2\delta_1)}{1 + r_{1s} r_{0t} \exp(-i2\delta_1)} \quad (1)$$

단 $t+r=1$, $r_{0t}=(N_0-N_1)/(N_0+N_1)$, $r_{1s}=(N_1-N_s)/(N_1+N_s)$ 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($\theta = 0^\circ$), 이 단층막의 두께 d_i 는 $d_i = (2m-1)\pi/2$, $m = 1, 2, \dots$ 이고, $n_1 d_1 = (2m-1)\lambda_0/4$ 로 되는 경우, 이 막의 굴절율이 $n_0 < n_1 < n_s$ 를 만족하면 $n_1 = (n_0 n_s)^{1/2}$ 의 조건으로 반사율은 0이 된다.

이층 반사방지막

이층 반사방지막은 단층 반사방지막에 비해 더 넓은 범위에서 낮은 반사율을 얻을 수 있다. 기판 위에 이층막(n_1, n_2 및 $n_1 d_1, n_2 d_2$)이 있는 경우 특성 matrix M은 각 층의 matrix M_1, M_2 의 곱으로 표시된다.

$$M = M_1 M_2 = \begin{bmatrix} A & iB \\ iC & D \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos\delta_i & i\sin\delta_i/n_i \\ i\sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R = \frac{(n_0 - n_s D) + i(n_0 n_s B - C)}{(n_0 A + n_s D) + i(n_0 n_s B + C)} \quad (4)$$

$$T = \frac{2n_0}{(n_0 A + n_s D) + i(n_0 n_s B + C)} \quad (5)$$

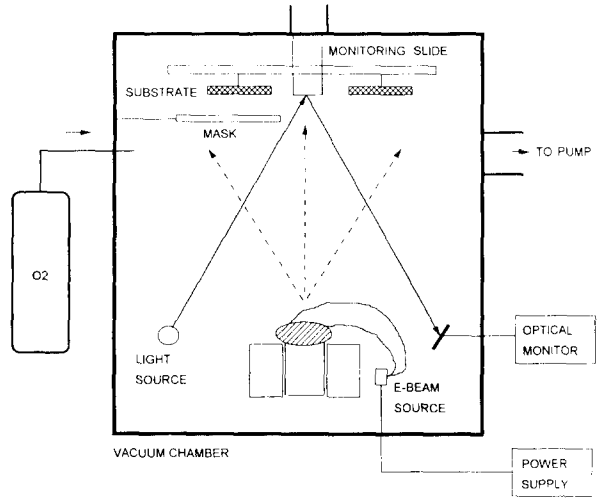


Fig. 2. Schematic illustration of E-beam system.

여기서, A, B, C, D는 matrix 요소이다.

식 (2), (3), (4)에서 $D/A = n_0/n_s$, $C/B = n_0 n_s$ 이며 식 (6), (7)의 관계를 얻는다.

$$\tan\delta_1 \tan\delta_2 = \frac{n_2 n_1 (n_s - n_0)}{n_1 n_s - n_1^2 n_0} \quad (6)$$

$$\frac{\tan\delta_1}{\tan\delta_2} = \frac{n_2 (n_0 n_s - n_1^2)}{n_1 (n_2^2 - n_0 n_s)} \quad (7)$$

이 때 막 두께 $n_1 d_1 = n_2 d_2$ 인 경우를 고려해 보면 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$ 인 경우 식(2), (3)으로부터 $B = C = 0$ 가 되므로 식(6)으로부터 진폭조건 $n_2^2 n_0 = n_1^2 n_2$ 가 얻어진다. 단 이때 굴절율은 $n_0 < n_1 < n_2 < n_s$ 인 조건을 만족한다.

둘째로, $n_1 d_1 = n_2 d_2 \neq \lambda_0/4$ 인 경우 식(6)으로부터 다음 식(8)이 얻어진다.

$$\cos\delta = \frac{n_1^2 n_s^2 n_0}{(n_1 + n_2)(n_1 n_s - n_0 n_2)} \quad (8)$$

식(7)로부터 진폭조건 $n_0 n_s = n_1 n_2$ 가 얻어진다. 이 조건은 두 파장에서 반사를 0으로 하는 것이 가능해 넓은 파장 영역에서 반사를 최소화 할 수 있다.

Tetragonal 구조의 point group D₄(422)에 속하는 TeO₂ 단결정은 비교적 느린 음향속도, 높은 굴절율, 0.33μm ~ 5.0μm의 넓은 투과 특성과 큰 압전 광학 상수 등을 가진 물질로 음향광학 매질로서 유용한 특성을 가졌다²⁾. TeO₂ 단결정의 표면에 A/R 코팅막 설계는 표 1과 같은 TeO₂ 단

Table 2. E-beam evaporation conditions for Al₂O₃, SiO₂ and ZrO₂ films

condition \ film	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂
Base pressure(torr)	5 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁶
Coating pressure(torr)	2 × 10 ⁻⁵	3 × 10 ⁻⁵	5 × 10 ⁻⁵
O ₂ flow	none	none	~6 × 10 ⁻⁵
Substrate temp.(°C)	250	250/350	250/350
E-beam current(mA)	120	70	110
Deposition rate(Å/s)	19	20	10

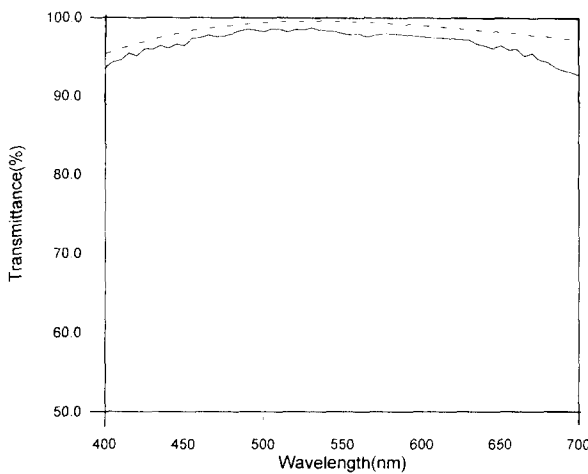


Fig. 3. Designed and measured transmittance of Al₂O₃ A/R coating(solid line : measured data, dotted line : calculated data)

결정의 굴절을 data를 사용하였다". 한편 파장 550nm에서 굴절률 1.63인 Al₂O₃ 막을 사용하여 단층 반사방지막을 제작하였으며, 굴절율이 각각 1.93, 1.46인 ZrO₂와 SiO₂ 막을 이용하여 이중 반사방지막을 제작하였다.

3. 실험 방법

TeO₂ sample 제작

그림 1과 같은 방위와 크기를 갖도록 TeO₂ 단결정을 준비하고 레이저 빔이 통과해야 하는 [110]양면은 λ/8 이상의 평활도를 갖도록 정밀 가공한다. 가공이 끝난 결정은 1. 1.1.-TCE, acetone, methanol, DI water의 순서로 각각 5분간 초음파 세척하여 cleaning하였다.

A/R 코팅 박막의 제작

본 연구에서 A/R 코팅막으로 제작한 Al₂O₃, ZrO₂, SiO₂ 박막은 E-beam 코팅 장비를 이용하였다. 장비의 대략적인 구성은 그림 2와 같은데 챔버의 직경은 90cm이며, crucible에서 기관까지의 높이는 약 60cm이다. 코팅 material은 일본 Optron사 제품으로 형태는 tablet이며, Al₂O₃, ZrO₂, SiO₂ 각각의 순도는 모두 99.99%이다.

ZrO₂ 박막의 증착시는 chamber내로 산소를 흘리며 박막의 stoichiometry를 맞추었다. E-beam 증착 시 기관은 약 15rpm의 속도로 자전 및 공전시켜 막 두께의 균일도를 향상시켰다. 증착시 chamber의 진공은 약 5 × 10⁻⁶ torr 이

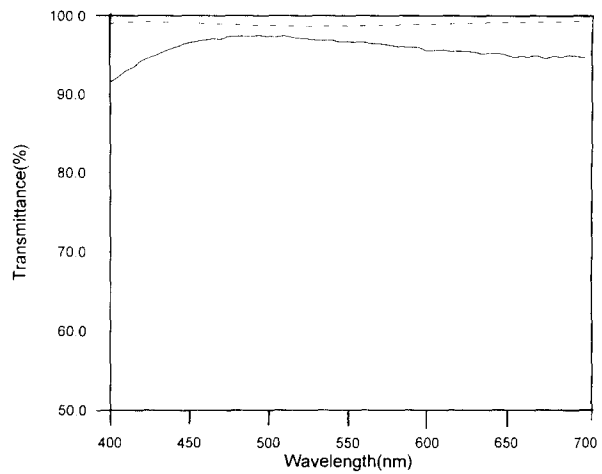


Fig. 4. Designed measured transmittance of ZrO₂/SiO₂ A/R coating(solid line : measured data, dotted line : calculated data)

었다. 또한 박막은 기관을 250°C와 350°C로 가열시키며 증착하였다. 각 박막의 증착 조건은 표 2와 같다.

증착 박막의 두께 조절은 optical monitor를 사용하여 광학간섭식 막두께 in situ monitoring하였다. 증착된 각 박막의 굴절율은 Ellipsometry를 사용하여 측정하였고, 투과율은 spectrophotometer(UV/VIS SPECTROPHOTOMETER, HITACHI U4001)를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

A/R 코팅막

AOM의 TeO₂ 결정에 있어 레이저 광이 통과하는 양면은 A/R 코팅막을 제작하여 레이저 power의 효율을 높인다. A/R 코팅이 실시되지 않은 TeO₂ 단결정의 경우 TeO₂ 단결정 매질 내 흡수 및 표면에서의 반사 등에 의해 약 25% 이상의 투과감소가 있다. 그러므로, DVDR 등 고밀도 광기록 장치에 사용되기 위해서는 고효율 레이저 사용이 요구되며 TeO₂ 결정의 광 입출력 면에 A/R 코팅이 반드시 필요하다. 종래의 경우 코팅막으로 Al₂O₃ 막을 사용하였다. Al₂O₃ 막으로 제작한 A/R 코팅막은 투과성, 접착성 등이 우수하나 고효율 레이저에 약한 단점이 있다. 그림 3은 Al₂O₃ 막을 532nm파장에 대해 λ/4두께를 입혀 A/R 코팅한 디자인 및 측정 결과이다. 그림 4는 SiO₂와 ZrO₂ 막을 사용하여 A/R 코팅한 경우 디자인 및 측정 결과이다. 이때 디자인의

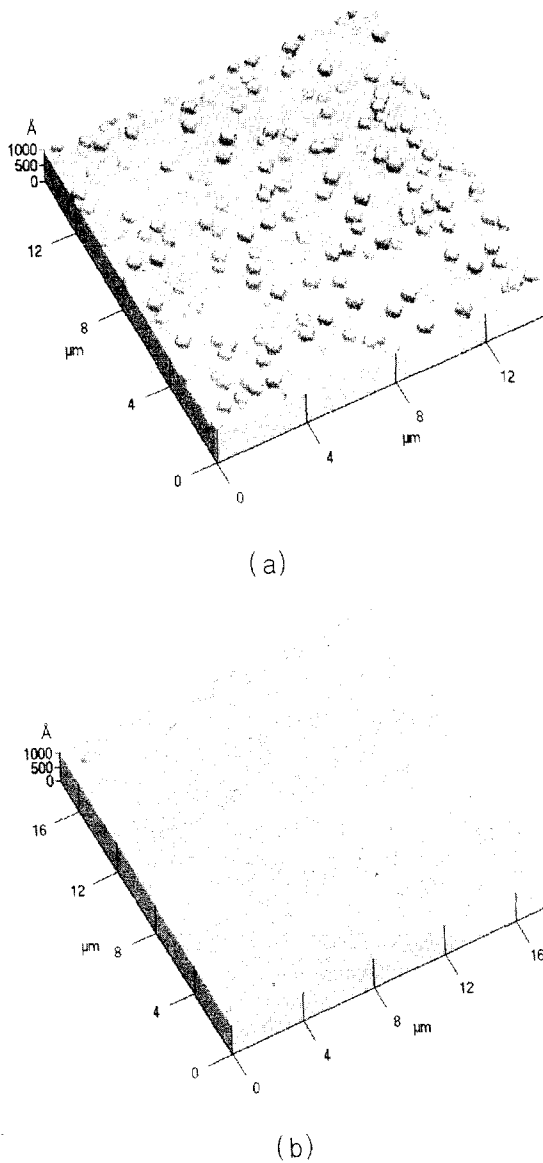


Fig. 5. AFM micrographs of A/R coating surfaces.(a) Al₂O₃, (b) SiO₂/ZrO₂

설계중심파장은 550nm이며 공기/ λ/4 SiO₂ λ/4 ZrO₂/TeO₂(기판)로 표현되는 광학두께를 갖도록 하였다. 각 A/R 코팅막의 디자인 결과는 결정의 한쪽 면에만 A/R 코팅을 실시하였을 경우로 가정하고 투과율을 계산한 결과이다. SiO₂와 ZrO₂의 코팅은 250°C 및 350°C로 기판을 가열하며 코팅을 실시하여 비교하였다. 한편 250°C에서 코팅한 A/R 코팅막의 경우 기판과의 접착력이 약해 박막의 기계적 강도가 떨어져 박막의 접착력 test 결과 박리하는 단점을 나타냈다. 제작한 각 A/R 코팅 샘플 표면을 AFM (Atomic Force Microscope)을 사용하여 표면 분석하였다. Al₂O₃와 SiO₂ 코팅막 표면을 약 25μm범위에서 scanning하여 약 1000Å높이까지의 표면을 비교하여 그림 5에 나타냈다. 그림 (a)의 Al₂O₃ 막의 경우 코팅 표면에 200~300Å크기의 입자들이 많이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 Al₂O₃ 코팅시 완전히 녹지 않은 Al₂O₃ 입자들이 증착 중에 기판 표면에 달라 붙은 것으로 생각되며 Al₂O₃ 막

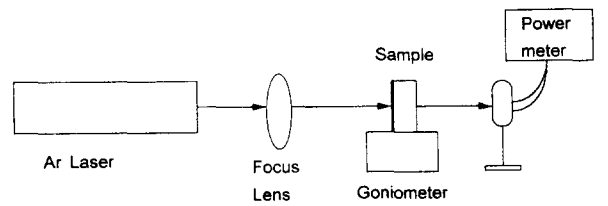


Fig. 6. Block diagram for measuring laser-induced damage threshold of A/R coating.

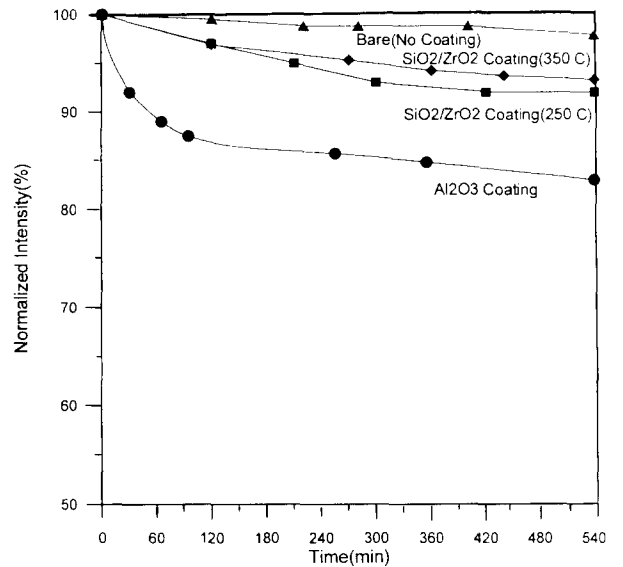


Fig. 7. Optical damage test of TeO₂ single crystal according to the variation of A/R coating materials.

을 고출력 레이저에 장시간 입사 시킬 때 막이 손상을 입어 출력 레이저 power가 떨어지는 원인 중 한가지로 생각된다. 그림 (b)의 SiO₂ 막의 표면의 경우 Al₂O₃ 막에 비해 표면 상태가 양호하게 형성되었고 표면 거칠기는 약 50Å 이하로 나타났다.

A/R 코팅막 레이저 내구성 실험

TeO₂ 단결정에 A/R 코팅막을 증착한 후 각 박막의 레이저 내구성(laser damage threshold)측정은 그림 6과 같은 구성에 의해 실시하였다. 측정에 사용한 레이저는 파장 514nm, 직경 2mm, CW 0.55W출력의 Ar 레이저이며, 레이저 power 밀도를 증가시키기 위해 초점거리 300mm인 focusing lens를 사용하여 빔을 focusing하였다. 이때 TeO₂ 결정의 단위면적 당 레이저 power density는 약 47W/mm²이다. TeO₂ 결정을 통과한 레이저 빔의 출력 power를 시간에 따라 power meter로 측정하였고 그 결과는 그림 7과 같다. Al₂O₃ 막의 경우 시간이 지날수록 레이저 출력 power는 계속 떨어져 약 6시간 경과 후에는 초기 출력 power에 대해 약 15% 정도 감소하였음을 볼 수 있다. 한편, 350°C로 증착 시킨 SiO₂/ZrO₂ 막은 약 6시간 경과까지 5%의 power감소가 있었으나 그 후 일정한 power가 유지 되었고 더 이상의 power 감소는 관찰되지 않았다. 250°C에서 증착한 SiO₂/ZrO₂ 막의 경우 power감소는 350°C에서 코팅한 경우보다 약간 작았다. A/R 코팅을 실시하지

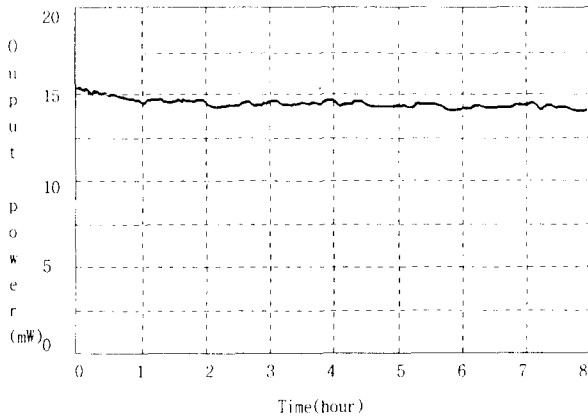


Fig. 8. Output power of SHG green laser when Al_2O_3 film was used for A/R coating of AOM.

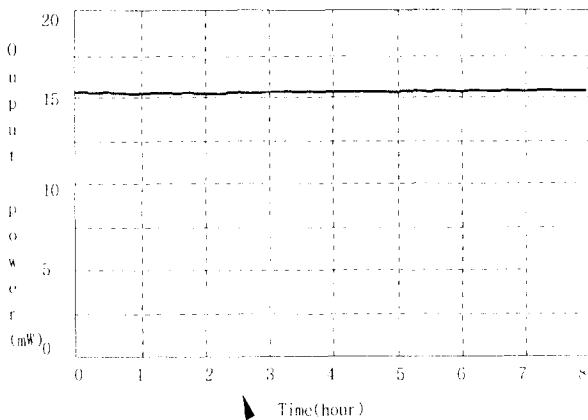


Fig. 9. Output power of SHG green laser when ZrO_2/SiO_2 films were used for A/R coating of AOM.

않은 bare TeO_2 단결정에 있어서도 9시간의 레이저 조사 후 약 2.5% 정도의 출력 감소가 측정되었다.

SHG 녹색 레이저 Long term 안정성

TeO_2 결정에 $16\mu m$ 두께의 $LiNbO_3$ transducer를 접합하고 전극 형성을 하여 200MHz용 AOM을 제작하였다. 제작한 AOM을 구동시키기 위해 532nm 파장의 20mW급 SHG 녹색레이저를 사용하였다. SHG 녹색 레이저는 빔 직경이 $240\mu m$, 빔 divergence가 6mrad 정도로 크므로 AOM에 focusing하기 전에 레이저 빔 출구에 최대한 가까이 초점거리 25mm인 렌즈로 빔을 collimating 시킨 후, 초점거리 28mm인 렌즈로 focusing하였다.

그림 8은 Al_2O_3 막으로 A/R 코팅한 AOM sample에 있어서 시간에 따른 출력 레이저 power의 변화를 보인다. 약

8시간 이상 장시간 사용시 레이저 출력 power가 초기 출력 power에 대해서 약 15% 정도 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이 출력 power 감소는 Al_2O_3 A/R 코팅막의 열화에 기인한 것으로 생각된다. 그림 9는 SiO_2/ZrO_2 를 A/R 코팅막으로 사용한 AOM sample에 있어서 시간에 따른 레이저 출력 power의 변화를 보이며 8시간의 장시간 실험에 있어서도 레이저 power drop 현상이 나타나지 않았다. 이러한 실험 결과는 Ar 레이저를 사용하여 A/R 코팅 막의 레이저 내구성을 측정한 그림 7의 결과와 일치한다.

5. 결 론

고밀도 광 기록이 요구되는 DVDR 시스템에 적용되는 200MHz 주파수의 음향광변조기는 고출력 레이저 빔의 사용이 요구된다. 음향광학 성능이 우수한 TeO_2 단결정을 사용하여 200MHz AOM을 제작하였다. 이때 TeO_2 단결정의 광 통과 면에 A/R 코팅을 실시하였고 각 A/R 코팅 재료에 대한 레이저 damage threshold를 측정하였다. Al_2O_3 막을 사용한 A/R 코팅은 SiO_2 와 ZrO_2 를 사용한 A/R 코팅에 비해 레이저에 쉽게 광손상을 입었다. 532nm 파장의 200mW급 SHG 녹색레이저를 사용하여 AOM 출력 power의 long term 안정성을 측정하였다. Al_2O_3 막을 사용한 AOM의 경우 8시간 사용 후 약 15%의 power 감소가 있었으나 ZrO_2/SiO_2 막을 사용한 AOM의 경우는 장시간 사용에도 레이저 power 감소가 없었다.

참 고 문 헌

1. Ammon Yariv, Quantum Electronics, 2nd. ed., Wiley & Sons, New York (1975)
2. P. Das and C. Decusatis, Acousto-optic Signal Processing : Fundamentals & Applications, Artech House Inc., Ch. 6, pp. 293, Massachusetts (1991)
3. Jieping Xu, Acousto-Optic Devices ; Principles, Design and Applications, John Wiley & Sons, Inc., Ch. 7, 393 (1992)
4. Thin film and their applications in optoelectronics, Ch. 2, pp. 242, Optronics, Japna (1993)
5. Naoya Uchida, Physical Review B, 14(10), 3736 (1971)
6. Jieping Xu, Acousto-Optic Devices ; Principles, Design and Applications, John Wiley & Sons, Inc., Appedix, 620, (1992)