

고출력 광섬유 레이저의 펌프 LD 보호기용 필터 설계 및 제작 특성

오승호

한국과학기술연구원 지능시스템연구본부, 서울 136-791,
연세대학교 전기전자공학과, 서울 120-749

전영민*

한국과학기술연구원 지능시스템연구본부, 서울 136-791

최우영

연세대학교 전기전자공학과, 서울 120-749

(2009년 6월 9일 받음)

고출력 광섬유 레이저에서 역입사되는 레이저 광으로부터 펌프 LD를 보호하기 위한 2색 필터를 설계하고 제작한 후, 그 특성을 측정하였다. 펌프 LD 발진 파장인 905 nm ~ 925 nm 대역에서 투과율은 99.9% 이상, 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장대역인 1020 nm ~ 1100 nm 대역에서의 투과율은 0.1% 이하가 되도록 필터를 설계하였다. Substrate를 SiO₂로 했을 경우, 박막의 접착력이 좋은 Oxide 계열 물질을 사용하는 것이 유리하여 SiO₂를 공통으로 Ta₂O₅와 ZrO₂를 사용하였다. Ta₂O₅와 ZrO₂를 이용하여 설계를 하여 필터를 제작한 후 그 특성을 비교하였다. 측정 결과 Ta₂O₅와 ZrO₂를 사용하여 제작한 두 필터 모두 투과율이 905 nm ~ 925 nm 대역에선 99.5% ~ 99.9%로, 1020 nm ~ 1100 nm 대역에선 0.01% ~ 0.09%로 측정되어 목표 기준치에 적합함을 확인하였다.

PACS numbers: 84.30.vn, 78.20.-e

Keywords: 2색 필터, 광학박막, 광섬유 레이저, 설계 및 제작

I. 서 론

최근 들어 광섬유 레이저의 수요가 기존의 초고속 통신용에서 고출력 가공용으로 이동하고 있으며, 이러한 고출력 광섬유 레이저는 고정밀, 고성능, 고속가공의 장점을 가지고 마이크로 전자산업의 레이저 광원과 다단 적층형 차세대 메모리 반도체 공정, 레이저 절단기, 용접기 등 다양한 응용장비에 적용이 가능할 것이다 [1-3, 6]. 그런데 레이저의 출력이 고출력이기 때문에 반사광이나 브릴루앙 산란광에 의해 역입사하는 광에 의해 펌핑용 레이저 다이오드(LD)가 파괴될 수가 있다 [6]. 이에 펌핑용 레이저 다이오드를 보호하기 위해서 펌프보호기가 반드시 필요하다(Fig. 1 참조). 특히, 고출력 레이저인 경우에는 damage threshold가 높은 ZrO₂를 사용해야 하지만 ZrO₂는 증착속도가 느려서 제작공정에 어려움이 많으므로, 꼭 필요한 경우 외에는 Ta₂O₅를 이용

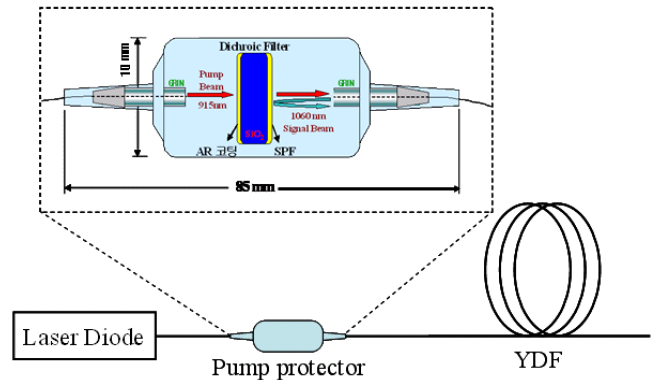


Fig. 1. Schematic diagram of the pump protector in a high power fiber laser system.

하는 것이 일반적이다 [7-9]. 이와 같은 펌프보호기 개발을 하기 위해서는 먼저, 코팅분야에 대한 이해를 통해 코팅 물질에 대한 사용파장대역에서의 투과율과 흡수계수, 증착속도, 물질간 굴절률의 차 등을 고려하여야 한다 [4,5].

*E-mail: ymjhon@kist.re.kr; Fax: +82-2-958-5709

본 논문에서는 역입사되는 레이저 광으로부터 펌프 LD를 보호하기 위한 2색 필터를 설계하고 제작한 후, 그 특성을 측정하였다. 두 가지 코팅물질의 종류를 이용해 (Ta_2O_5/SiO_2)와 (ZrO_2/SiO_2)를 각각 설계하여 제작된 두 필터의 특성을 비교 분석하였다. 여러 코팅에 관한 필터 설계에 관한 논문은 많았지만 고출력 광섬유 레이저의 펌프 LD 보호기용 필터 설계와 제작에 관한 논문은 본 논문이 최초로 시도되었다.

II. 이 론

기본적인 적층은 두 개의 유전체 물질로 구성되는데, 하나는 고굴절률(H)이고 다른 하나는 저굴절률(L)이다.

$$\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^n \quad (1)$$

이런 형태의 구조는 짧은 파장 영역에서 리플이 작기 때문에 선택되고 투과밴드가 존재한다. 주기적 대칭에 의해 등가의 광학적 두께와 등가의 굴절률처럼 단일층으로 나타난다. 박막이 균일하다고 가정했을 때 반사율 계산은 전기장과 자기장의 총 진폭변수를 사용한 행렬에 의하여 수행된다. 각 층에 대해 하나의 2×2 행렬이 다음과 같이 정의된다 [10,11].

$$M = \begin{pmatrix} \cos g_j & \frac{1}{\eta_j} \sin g_j \\ i\eta_j \sin g_j & \cos g_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 $g_j = (2\pi / \lambda)n_j d_j \cos \theta_j$ 이고, $\eta_j = n_j / \cos \theta_j$ 는 p-편광에 대한 광학적 어드미턴스, $\eta_j = n_j \cos \theta_j$ 는 s-편광에 대한 광학적 어드미턴스, d_j 는 박막의 물리적 두께, θ_j 는 굴절각, n_j 는 j 번째 층의 굴절률, $i^2 = -1$ 이고 λ 는 진공 중의 파장이다. 이 행렬들은 다음의 특성을 나타낸다. 주 대각선 성분은 실수이고 부 대각선 성분은 허수이며 행렬의 개수는 막의 층수 N 과 같다. 전체 박막의 행렬은 각 층의 행렬의 곱으로 표현되며 다음과 같은 형태이다.

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^N M_j \quad (3)$$

입사 광학계에서 전기장과 자기장은 출력 광학계의 값과 행렬로 연결된다.

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

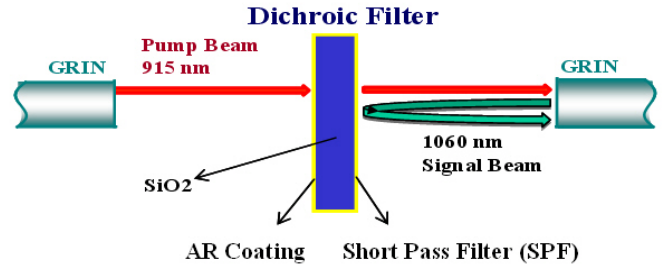


Fig. 2. Proposed structure of the normal incidence type dichroic filter.

여기서 η_s 는 기판의 광학적 어드미턴스다. 식 (4)는 박막의 특성을 계산하는 정보를 포함하고 있다. 따라서 다음과 같은 적층막의 반사율이 얻어진다.

$$R_s = \left| \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right|^2 \quad (5)$$

여기서 η_0 는 입사매질의 광학적 어드미턴스다 [2].

III. 2색 필터 설계

본 논문에서는 펌프 LD 발진 파장인 905 nm ~ 925 nm 대역에서 투과율을 99.9 % 이상으로 투과시키면서 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장 대역인 1020 nm ~ 1100 nm 대역에서의 투과율을 0.1 % 이하가 되도록 필터를 설계하였다. Fig. 2는 제안된 필터의 설계 구조의 그림이다. 2색 필터의 한 쪽 면에는 단파장 투과필터(Short Pass Filter, SPF)를, 반대쪽 면에는 무반사(Anti-Reflection, AR) 코팅을 설계하였다. 여기에서 AR 코팅은 삽입손실을 줄이기 위해서뿐만 아니라 LD에서 나온 빛이 반사를 하여 LD로 역입사하여 레이저의 발진을 불안정하게 하거나 오동작을 일으키는 것을 막고 보호하기 위해 필요한 것이다.

AR 코팅과 SPF 설계 시, 기본적인 조건은 다음과 동일하다. Substrate는 SiO_2 , 박막 물질은 고반사 물질(H)인 ZrO_2 와 Ta_2O_5 , 저반사 물질(L)인 SiO_2 , 기준 파장은 1240 nm(Ta_2O_5/SiO_2), 1220 nm(ZrO_2/SiO_2)를 사용하였고 입사 각도는 0° 를 기준으로 하였다. 본 설계를 위해서 Essential Macleod Program을 이용하여 AR과 SPF를 설계 하였다. 프로그램 순서는 기준 파장을 정하고 원하는 박막 층수를 설정하여 원하는 파장대 영역의 기준에 최대한 맞춰 설계해 내는 과정을 가진다. 설계가 끝나면 이 설계를 바탕으로 실제로 만들기 전에 Run-Sheet & Simulator 기능을 이용하여 증착과정에서 발생 가능한 오차율을 반영하여 결과를 확인함으로써, 실제

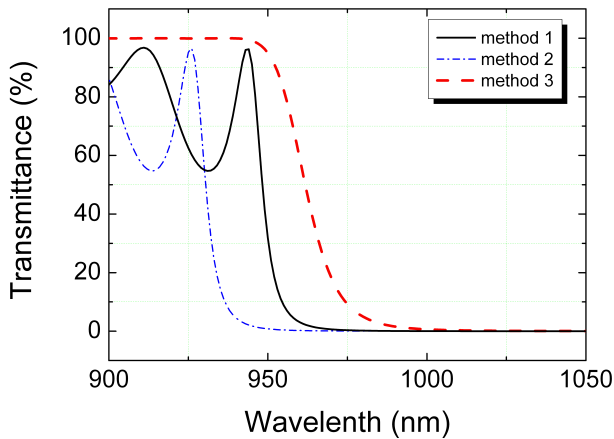


Fig. 3. Design process of the filters for pump protectors.

생산에서 수율을 높일 수 있게 한다. 여기까지의 과정이 모든 설계과정이다. 처음에는 Ta₂O₅와 SiO₂를 이용해 SPF를 설계하였으나, 1020 nm 대역에서 흡수가 적어 damage threshold가 더 높은 ZrO₂를 추가로 설계하였으며, 총 층수는 32층으로 31층의 맨 위 층에 SiO₂를 한층 더 올려서 설계를 하였다. 이는 31층으로 했을 때 905 nm ~ 925 nm에서 더 안정적인 수치와 그래프 파형을 가질 수 있었기 때문이다. 다음에서는 고출력 사용에 유리한 ZrO₂/SiO₂를 이용한 설계 과정을 설명하였다. Ta₂O₅/SiO₂의 설계 과정은 ZrO₂/SiO₂의 설계 과정과 동일하다. 처음 설계한 설계치를 최종 설계로 변환하는 과정은 Fig. 3의 그래프로 설명하였다.

우선 검정색(graph 1) 그래프가 처음 설계한 SPF 박막의 투과율 곡선이다. 이때 기준파장은 1250 nm로 945 nm에 최대치가 있는 것을 확인할 수 있다. 이 최대치의 기준점을 설계 시 원하는 최대 목표치가 되는 925 nm로 그래프를 전체적으로 움직여서 원하는 영역대의 기준을 맞춰야 한다. 기준파장을 1220 nm로 변경시킨 그래프가 파란색(graph 2) 그래프이다. 기준파장을 변화시킨 후 최대한 범위를 넓혀 890 nm ~ 940 nm 사이에 투과율을 99.9 % 이상으로 정하고 Ripple 제거를 시키게 되면 최종적인 빨간색(graph 3) 그래프를 얻을 수 있다. Fig. 4는 Ripple이 제거된 최적화된 최종적인 그래프 파형이다. 이 그래프를 보면 우리가 원하는 파장 영역대의 목표치를 만족시키고 있음을 알 수 있다.

Figure 4를 보면 905 nm ~ 925 nm에서 투과율이 99.9 % 이상이 되었으며, 1020 nm ~ 1100 nm에서 투과율은 0.1 % 이하가 됨을 확인하였다.

이렇게 설계한 최종 설계치를 제품으로 생산하기 전에 RunSheet & Simulator 기능을 이용하면 장비특성, 증착오차, 증착조건 및 오퍼레이터의 특성을 반영하여 실

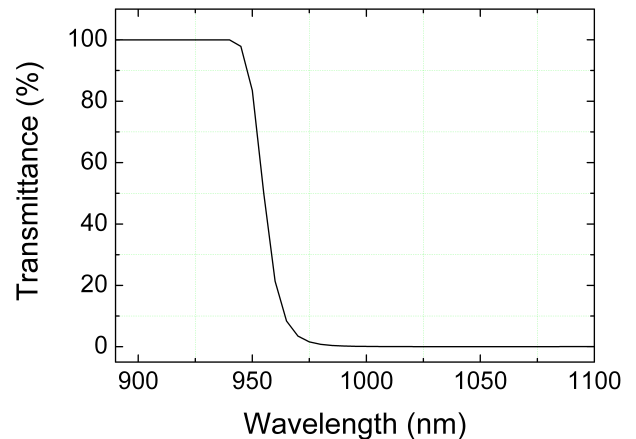


Fig. 4. Transmittance graph of the SPF for pump protectors. (ZrO₂/SiO₂)

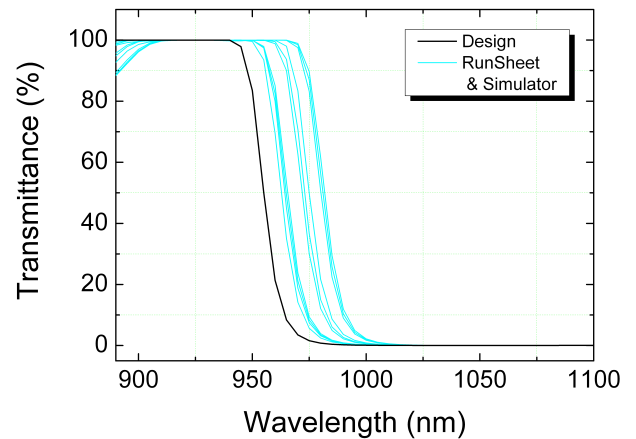


Fig. 5. Characteristics analysis of the SPF using RunSheet & Simulator. (ZrO₂/SiO₂)

제 생산품을 사전에 분석하여 생산시간과 원가를 절감할 수 있는 제조 설계를 할 수 있다. RunSheet & Simulator 과정 중 각 물질들에 Material Mean Error(각 층에 물질의 평균 Error를 0.01(1 %)), Material Standard Deviation(1차 증착, 2차 증착에 따른 Error를 0.01(1 %)), Layer Mean Error(층별 평균 Error를 0.01(1 %)), Rate Mean Error(= 0.01), Rate Standard Deviation(= 0.01), Mean Change Interval(데이터를 받는 시간(0.1초마다)) 등을 지정하여 설계하였다. 이는 발생 가능한 오차를 변수들에 반영하여, 최대한 우리가 설계한 설계치에 근접한 생산품을 만들어 내기 위한 최종적인 과정이다. Fig. 5는 실제 코팅과정에서 발생 가능한 오차율을 반영한 경우 나타날 수 있는 투과율 곡선들이다. 이 그래프에서 보면 여러 개의 파형들을 볼 수 있는데 이는 설계 후 오차율을 적용하여 무작위로 10개를 추출해 내서 나타낸 파형들이다. 여기서 모든 파형의 그래프들이 우리의 목

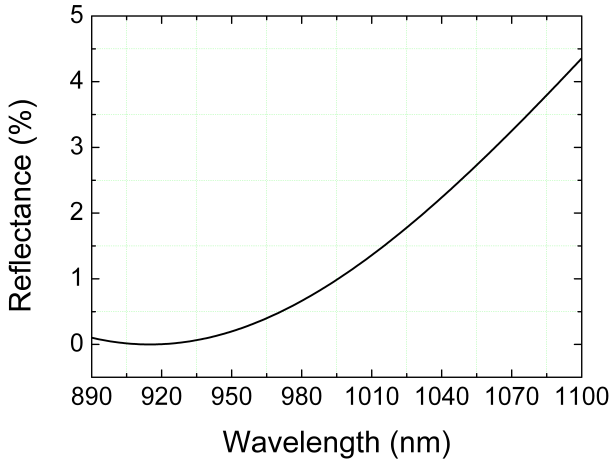


Fig. 6. Transmittance graph of the AR coating design.

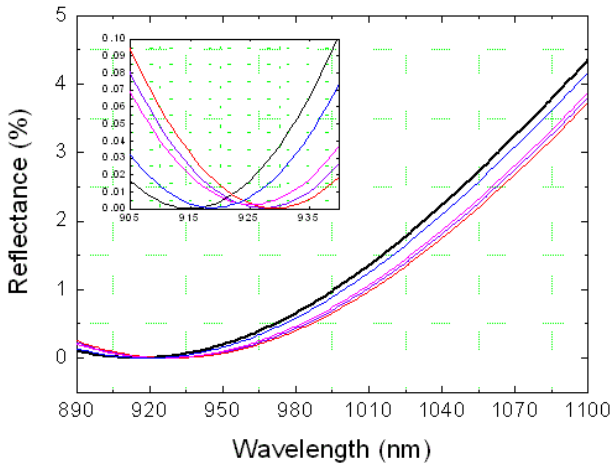
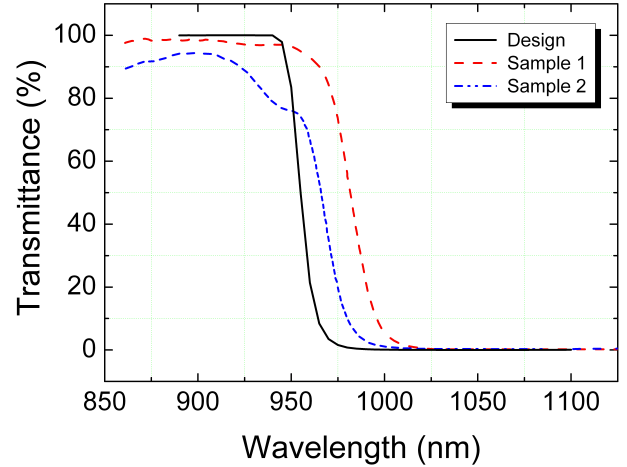


Fig. 7. Characteristics analysis of the AR coating using RunSheet & Simulator. (ZrO_2/SiO_2)

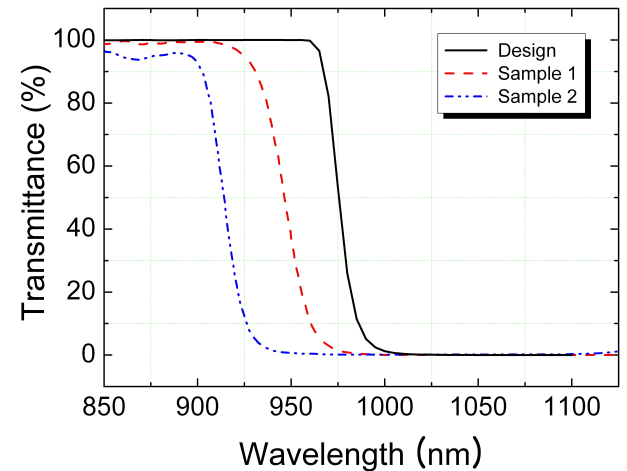
표 기준치에서 벗어나지 않으므로 안정적으로 잘 설계된 것이라는 것을 알 수 있다.

다음은 SPF가 설계된 Substrate의 반대쪽 면에서 생기는 반사를 없애주기 위한 AR 코팅 설계이다. AR 설계 시 고반사 물질(H)에는 ZrO_2 , 저반사 물질(L)에는 SiO_2 를 사용하여 2층으로 설계하였다. 그밖에 모든 설계조건은 SPF 설계와 동일한 기준을 적용하였다. 하지만 이 코팅에선 905 nm ~ 925 nm 사이 투과율이 기준이 아닌 반사율을 기준으로 0.1 % 이하가 되도록 목표치를 정하였다. Fig. 6은 AR 코팅 설계에 따른 투과율 그래프이다. 그래프 파형을 보면 알 수 있듯이 목표치인 905 nm ~ 925 nm에서 0.1 % 이하의 반사율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6을 보면 905 nm ~ 925 nm에서 반사율이 0.1 % 이하가 되는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8. (a) Comparison of the design and fabrication characteristics of the filter using ZrO_2/SiO_2 . (b) Comparison of the design and fabrication characteristics of the filter using Ta_2O_5/SiO_2 .

SPF 설계에서와 마찬가지로 여기에서도 RunSheet & Simulator 기능을 이용하여 코팅 과정 중에 발생할 수 있는 오차를 1 % (SPF와 동일조건)의 오차를 적용)로 지정해 나온 무작위 5개의 파형을 Fig. 7에 나타내었다. 여기서도 알 수 있듯이 5개의 파형 모두 목표 기준치에 벗어나지 않아 안정적이고 잘 설계된 것임을 확인할 수 있다.

IV. 제작된 필터의 특성

설계된 필터에 따라서 이온보조 전자빔 증착기를 이용해 필터를 증착하였다. 본 연구에서 사용한 증착용 진공 챔버는 Bell Jar Type이 아닌 Box Type으로서 (주)한일진공기계의 HVC800DA를 이용하여 증착하였다. 챔버

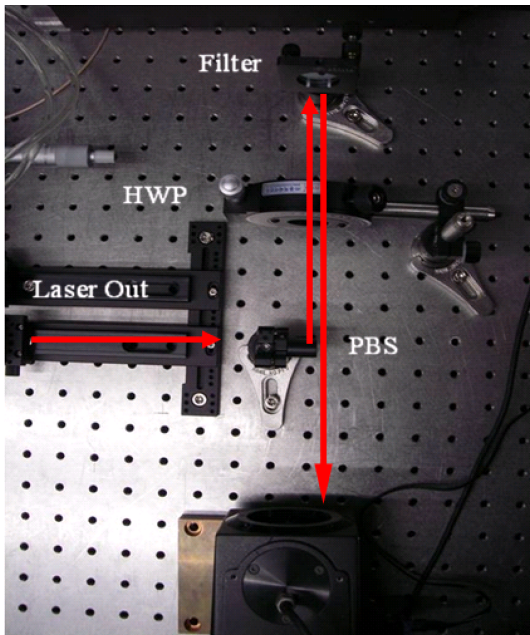


Fig. 9. Experimental setup for filter operation test using 1064 nm high power fiber laser.

크기는 800 mm이며 4-segmented basket을 가지고 있다. Electron Beam과 Thermal Source를 사용할 수 있으며, ion source를 이용한 ion-assisted deposition 방법으로 E-beam을 이용하여 SiO₂, Ta₂O₅, ZrO₂ 박막을 증착하였다. 증착 시 Ta₂O₅의 증착속도는 0.3 nm/min, ZrO₂는 0.5 ~ 0.6 nm/min이다.

Figure 8(a)는 미리 설계된 ZrO₂/SiO₂의 그래프와 실제로 제작하여 그 특성을 측정한 그래프이다. 실제 증착 시 발생 가능한 오차율들을 감안하여 설계했기 때문에 제작된 필터의 광학적 특성을 측정한 결과와 잘 일치하였다. 다만, 단파장 영역에서 반사율이 일부 떨어지는 것은 증착 시 코팅물질이 불균일하게 증착 되었고 장비가 가지고 있는 오차와 물질간 두께에 따른 굴절률과 투과율의 차이로 인한 것으로 판단된다. 제작된 필터는 2개로 설계치와 차이를 비교할 수 있다. 필터 설계 시 905 nm ~ 925 nm에서 투과율을 99.9 % 이상으로 투과시켰으나 실제 제작된 sample 1필터의 905 nm ~ 925 nm에선 96.65 % ~ 98.52 %로 약 2 % ~ 3 %의 오차를 확인할 수 있었다.

1020 nm ~ 1100 nm에선 설계 시, 0.1 % 이하가 되게 설계하였고, 제작된 필터를 측정해 본 결과 0 % ~ 0.63 %로 약 0.5 % 이내의 오차로 안정적인 투과율을 보였다.

Figure 8(b)는 Ta₂O₅/SiO₂를 이용하여 설계한 그래프와 제작하여 특성을 측정하여 나타낸 그래프를 비교한 것이다. 설계는 905 nm ~ 925 nm에서 투과율을 99.9 % 이상으로 투과시켰으나 실제 제작된 sample 1필터의 905

Table 1. Output characteristics of the fiber laser at maximum output power.

Beam Diameter	0.8 mm
Pulse Width	15 ns
Pulse Repetition Rate	20 kHz
Average Power (P_{avg})	7.5 W
Peak Power (P_{peak})	25 kW
Average Intensity (I_{avg})	0.3 MW/cm ²
Peak Intensity (I_{peak})	1 GW/cm ²

nm ~ 925 nm에선 95.61 % ~ 99.49 %로 약 4 % ~ 5 %의 오차를 확인할 수 있었다. 1020 nm ~ 1100 nm에선 0 % ~ 0.07 %의 투과율을 보여 ZrO₂/SiO₂ 설계처럼 안정적인 투과율을 보였다.

Figure 9는 1064 nm 광섬유 레이저를 이용한 고출력에서의 필터 동작특성 실험 장치도 사진이다. 필터의 damage threshold 측정을 위해 펌프보호기가 실제로 장착될 광섬유 레이저의 출력을 높여가면서 실험을 하였지만 두 필터 모두 최대 출력에서도 정상적으로 동작되어 펌프 보호기로 사용이 가능함을 확인하였다. 1064 nm 광섬유 레이저의 최대 출력에서의 필터의 동작특성을 측정한 결과 두 필터 모두 최대 평균 출력 25 kW (beam dia 0.8 mm), 최대 침투 강도 1 GW/cm²까지 정상적으로 동작함을 확인하였다.

실험에 사용된 레이저의 출력특성은, 빔 사이즈 0.8 mm, 펄스 반복율 20 kHz, 펄스폭 15 ns이며, 평균 출력은 7.5 W이다. 레이저의 최대 출력에서의 출력특성은 Table 1에 정리하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 박막설계 프로그램인 Essential Macleod Program을 이용하여 Air/0.5L/H/(L/H)¹⁵/SiO₂의 구조로 32개 층(SPF)과 2개 층(AR)을 쌓아 설계하였고, 이 설계된 것을 바탕으로 제작된 필터의 특성을 측정하였다. 그 결과 905 nm ~ 925 nm에서의 투과율은 이론적으로 설계했을 때와 실제로 증착 제작하여 측정하였을 때의 값이 다르게 나온 것을 확인할 수 있었다. 이는 공정상 증착 시킬 때, 증착 속도, 두께에 따른 투과율과 굴절률 등 미리 예상치 못한 영향을 받아 오차가 일어난 것이라는 결론을 냈다. 이는 앞으로 더 정밀한 공정 기술과 박막의 두께와 굴절률을 정확하게 분석하여 박막의 특성을 왜곡시키는 원인을 찾아내어 설계에 반영한다면 최적의 필터를 설계할 수 있을 것이다. 이런 과정이 뒷받침

된다면 특정 영역대에서의 투과, 반사를 원하는 기준치에 맞게 사용하여 다양한 형태의 필터 설계와 제작이 가능할 것이라 생각된다. 또한 ZrO_2/SiO_2 와 Ta_2O_5/SiO_2 각각의 설계를 통해 필터를 제작하여 특성을 측정하고 실제 예상된 오차율과 설계치, 목표치가 안정적인 필터는 Fig. 7(a)를 통해 ZrO_2/SiO_2 를 이용한 필터임을 확인할 수 있다.

또한, 펌프보호기가 실제로 장착될 광섬유 레이저를 이용하여 고출력에서의 필터의 동작특성을 측정한 결과, 최대 평균 출력 25 kW (beam dia. 0.8 mm), 최대 첨두 강도 $1GW/cm^2$ 까지 정상적으로 동작함을 확인하였다.

제작된 두 가지 필터가 목표 설계치와 유사하게 905 nm ~ 925 nm 대역에서 투과율은 95.61 % ~ 99.49 %로, 1020 nm ~ 1100 nm 대역에서 투과율은 0.01 % ~ 0.63 %로 측정되어 고출력 레이저에서 펌프 레이저다이오드를 보호하기에 적합한 성능을 보였으며, 따라서 펌프보호기용 필터로서 응용 가능하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 핵심기술개발사업 “다단계 증폭결합형 100 W급 Scalable 1064 nm 펄스 광섬유 레이저 개발”의 일부 지원으로 수행되었습니다. 장지웅 박사(한국과학기술연구원)의 유익한 조언과 성실한 도움에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. Nilsson, J. K. Sahu, Y. Jeong, W. A. Clarkson, R. Selvas, A. B. Grudinin and S. Alam, *SPIE* **4947**, 50 (2003).
- [2] Y. J. Park, J. H. Park, Y. M. Hwang Y. H. Kim, J. H. Lee and S. H. Lee, *Hankook Kwanghak Hoeji* **8**, 3 (1997).
- [3] J. D. Rancourt, *Optical Thin Films Users' Handbook* (McGraw-Hill, 1987).
- [4] S.-Y. Shim, S. S. Lee and D. W. Shin, *J. Korean Phys. Soc.* **46**, 187 (2005).
- [5] C. C. Lee, J. C. Hsu, D. T. Wei and J. H. Lin, *Thin Solid Films* **308**, 74 (1997).
- [6] S. H. Oh, H. M. Sung, Y. M. Jhon and W. Y. Choi, *16th COOC 2009*, 21 (2009).
- [7] H. Sohn, B.-J. Lee and Y.-T. Cho, *J. Korean Phys. Soc.* **51**, 1038 (2007).
- [8] S. G. Yoon, S. M. Kang and D. H. Yoon, *J. Korean Phys. Soc.* **49**, 237 (2006).
- [9] Y. Zhan, Y. Wang, H. Gong, J. Shao and Z. Fan, *Applied Surface Science* **210**, 353 (2003).
- [10] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, 2nd edition (Macmillan, 1986).
- [11] Hujiwarasirow, S. H. Han and W. S. Kim, *Thin Films Optics* (Ulsan University, 1995).

Design and Fabrication Characteristics of Filters for Pump LD Protectors for High-power Fiber Lasers

Seung Ho OH

*Intelligent System Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791,
Department of Electronics Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749*

Young Min JHON*

Intelligent System Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

Woo Young CHOI

Department of Electronics Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

(Received 9 June 2009)

We designed and fabricated dichroic filters for high-power fiber lasers to protect the pumping laser diode from counter-propagating laser beams. The transmittance at laser diode wavelengths of 905 nm ~ 925 nm was designed to be more than 99.9 %, and the transmittance at the fiber laser, or Brillouin scattering, wavelengths of 1020 nm ~ 1100 nm was designed to be less than 0.1 %. Since oxide materials have good adhesion to SiO₂ substrates, Ta₂O₅ and ZrO₂ were used on common SiO₂ substrates. Filters using Ta₂O₅ and ZrO₂ were designed and fabricated, and their characteristics were measured and compared. The filters using Ta₂O₅ and ZrO₂ showed transmittances of 99.5 % ~ 99.9 % at 905 nm ~ 925 nm and of 0.01 % ~ 0.09 % at 1020 nm ~ 1100 nm, which coincides with the required standards.

PACS numbers: 84.30.vn, 78.20.-e

Keywords: Dichroic filter, Thin films, Fiber lasers, Design and fabrication

*E-mail: ymjhon@kist.re.kr