

Ta₂O₅/SiO₂를 이용한 고출력 광섬유 레이저의 펌프 LD 보호기용 반사형 필터 설계 및 제작

성하민 · 김재현 · 이 석 · 전영민[†]

한국과학기술연구원 센서시스템센터
Ⓞ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

(2012년 4월 13일 받음, 2012년 6월 7일 수정본 받음, 2012년 6월 11일 게재 확정)

본 논문에서는 고출력 광섬유 레이저에서 역입사되는 레이저 광으로부터 펌프 LD를 보호하기 위한 반사형 2색 필터를 설계하고 제작하였다. 펌프 LD 발진 파장인 905 nm~925 nm 대역에서 투과율은 0.1%이하, 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장대역인 1020 nm~1100 nm 대역에서 투과율은 99.9% 이상이 되도록 필터를 설계하였다. 기판(Substrate)은 SiO₂로 사용하고 접착력이 우수한 Oxide 계열 물질인 SiO₂/Ta₂O₅를 박막 재료로 사용하였다. 최적화된 설계를 한 후 필터를 제작하였고, 그 특성을 비교하였다. 제작된 필터의 투과율이 905 nm ~ 925 nm 대역에선 0.1%이하, 1020 nm~1100 nm 대역에선 95.5% 이상으로 측정되어 공정오차를 고려한 설계범위 안에 들어움을 확인하였다. 제작된 필터는 레이저 출력 1W이상의 입력광에 대해서도 정상 동작함을 확인하였다.

Design and Fabrication of Reflection-type Pump LD Protection Filters for High Power Fiber Lasers by Using Ta₂O₅/SiO₂ Thin Films

Hamin Sung, Jae Hun Kim, Seok Lee, and Young Min Jhon[†]

Sensor System Research Center, Korea Institute of Science and Technology,
39-1 Hawolkok, Seongbuk, Seoul 136-791, Korea

(Received April 13, 2012; Revised manuscript June 7, 2012; Accepted June 11, 2012)

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 less than 0.1% and the transmittance at the fiber laser or Brillouin scattering wavelengths of 1020 nm ~ 1100 nm was designed to be more than 99.9%. Since oxide materials have good adhesion to the SiO₂ substrate, SiO₂/Ta₂O₅ were used as coating materials. The filter was fabricated according to our optimized design and its characteristics were compared with the theoretical design. As a result, the transmittance at laser diode wavelengths of 905 nm~925 nm was measured to be less than 0.1%, and the transmittance at the fiber laser or Brillouin scattering wavelengths of 1020 nm~1100 nm was measured to be more than 95.5%, which coincided well with the theoretical design considering processing errors. The filter was found to operate well over 1W of input laser power.

Keywords: Thin films, Dichroic Filter, Fiber Lasers

OCIS codes: (310.0310) Thin Films; (060.3510) Lasers, fiber; (310, 1210) Antireflection coatings; (310.4165) Multilayer design

I. 서 론

광학 박막은 1950년 Abeles가 특성 행렬을 이용하여 박막 설계의 기본 이론을 확립한 이래 많은 발전을 하고 있으며, 특히 개인용 컴퓨터의 출현으로 다양한 방법으로 설계를 쉽게 할 수 있어 광학 박막의 응용이 빠르게 증가하고 있다.

또한 이온 빔을 이용한 증착 기술의 발전으로 박막의 광학적 및 기계적 특성을 향상시키고 있다. 최근에는 초고속 대용량 광 정보통신의 발전, 다양한 성능을 갖는 광학 기기의 빠른 발전, 레이저, 광 센서, 광자기술, 광전자 등의 발전에 따라 고품질의 박막을 제작하기 위한 기술이 급속히 발전하고 있다^[1-3]. 특히 광섬유 레이저의 수요가 기존의 초고속 통신용

[†]E-mail: ymjhon@kist.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

에서 고출력 가공용으로 이동하고 있으며, 이러한 고출력 광섬유 레이저는 고정밀, 고성능, 고속가공의 장점을 가지고 마이크로 전자산업의 레이저 광원과 다단적층형 차세대 메모리 반도체 공정, 레이저 절단기, 용접기 등 다양한 응용장비에 널리 사용되고 있다^{4, 5)}. 그런데 이러한 고출력 레이저에서는 극히 일부의 반사광이나 브릴루앙 산란광 같이 역입사하는 광에 의해서 펌핑용 레이저 다이오드(LD)가 파괴될 수가 있다. 이 펌핑용 LD를 보호하기 위해서 필요한 것이 펌프보호기이다. 이와 같은 펌프보호기를 개발하기 위해서는 2색 필터를 제작해야 하는데, 이를 위해 코팅 물질에 대한 사용파장대역에서의 투과율과 흡수계수, 증착속도, 물질간 굴절률의 차 등을 고려해야 하는데^{6, 7)}, 기판을 SiO₂로 사용할 경우 접착력이 우수한 Oxide계열 물질인 SiO₂/Ta₂O₅를 박막 재료로 사용하는 것이 유리하다⁸⁾. 기존의 연구에서 우리는 투과형 펌프보호기를 설계하여 제작하였다⁹⁾. 그런데, 필터를 패키징할 때 소형화하기 위해서는 투과형 보다 반사형 펌프보호기를 이용하는 것이 유리하다¹⁰⁾.

본 논문에서는 접착력이 우수한 SiO₂/Ta₂O₅를 코팅물질로 이용하여 반사형 펌프보호기를 위한 2색 필터를 설계하였고, 그 필터를 제작한 후 특성을 측정하였으며, 고출력 레이저를 입사시켜 최대 동작 레이저 출력을 측정하였다.

II. 반사형 펌프보호기용 2색 필터의 설계

본 논문에서는 펌프 LD 발진 파장인 905 nm~925 nm 대역에서 투과율을 0.1% 이하로 투과되도록, 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장대역인 1020 nm~1100 nm 대역에서의 투과율을 99.9% 이상으로 투과되도록 필터를 설계하였다. Fig. 1은 제안된 필터의 설계 구조의 그림이다. 2색 필터의 한 쪽 면에는 장파장 투과필터(Long Pass Filter, LPF)를, 반대쪽 면에는 무반사(Anti-Reflection, AR) 코팅을 설계하였다. 여기에서 AR 코팅은 삽입손실을 줄이기 위해서뿐만 아니라 LD에서 나오는 빛의 4%를 반사하여 LD로 역 입사하여 레이저의 발진을 불안정하게 하거나 파괴되는 것을 막고 보호하기 위해 필요한 것이다.

LPF와 AR 코팅 설계 시, 기본적인 조건은 다음과 동일하다. 기판은 SiO₂, 박막 물질은 고굴절(H) 물질인 Ta₂O₅, 저굴절(L) 물질인 SiO₂, 기준 파장은 900 nm를 사용하였고 입사각도는 0°를 기준으로 하였다. 본 설계할 때 Essential Macleod Program(Thin Film Center Inc.)을 이용하였다. 프로그램을

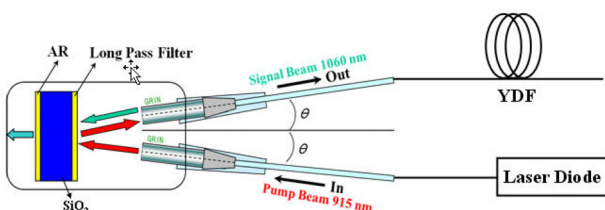


FIG. 1. Structure of reflection-type pump LD protection filter.

이용한 설계 순서는 기준 파장을 정하고 원하는 박막의 층수를 설계 구조에 맞게 설정하여 원하는 파장대 영역의 기준에 최대한 맞춰 설계해 내는 과정을 가진다. 설계가 끝나면 이 설계를 바탕으로 실제 공정 과정을 하기 전에 전산모의(Simulation) 기능을 이용하여 증착 과정에서 발생 가능한 오차를 반영하여 결과를 확인함으로써, 실제 생산에서 안정성을 높일 수 있다.

Fig. 2는 기본적인 공기(0.5H L 0.5H)^17/기판의 34층 구조로 된 장파장 투과 필터 투과율 그래프와 잔물결(Ripple)을 제거하여 최종 목표 설계치에 맞춰 최적화된 설계의 투과율 그래프를 보여준다. 기본 구조로 설계한 뒤 최적화시킬 때 Fig. 2에서와 같이 잔물결이 없어지면서 LPF의 투과율이 99% 이상으로 되는 지점이 단파장 쪽으로 이동하게 된다. 이러한 점을 고려하여 기준 파장을 결정하고 설계하였다. 최적화 결과, 최종 목표 설계치인 905 nm~925 nm 대역에서는 투과율이 0.1% 이하가 되었으며, 1020 nm~1100 nm 대역에서 투과율은 99.9% 이상이 됨을 확인할 수 있다. 이렇게 최적화된 설계를 이용하여 장비특성, 증착오차, 증착조건 및 오퍼레이터의 특성을 반영하여 실제 공정 중에 발생할 수 있는 공정오차를 고려한 실제 생산품의 특성을 사전에 분석하여 생산시간과 원가를 절감할 수 있는 제조 설계를 할 수 있다. 그리하여 실제 발생 가능한 공정 오차를 고려하여 두께 오차의 평균(Thickness Mean Error)은 1%, 두께 오차의 표준편차(Thickness Standard Deviation)는 5%, 굴절률 오차의 표준편차(Refractive Index Standard Deviation)는 0.1%로 설정하였다. 이는 발생 가능한 오차를 변수들에 반영하여, 최대한 우리가 설계한 설계치에 근접한 생산품을 만들어 내기 위한 설계 과정이다.

Fig. 3은 실제 코팅 과정에서 발생 가능한 오차를 반영한 경우 나타날 수 있는 투과율 그래프이다. 이 그래프에서 보면 여러 개의 파형들을 볼 수 있는데 이는 설계 후 오차를 적용하여 무작위로 추출해 내서 나타낸 파형들이다. 대부분 파형의 그래프들이 설계 목표 기준치에서 벗어나지 않았

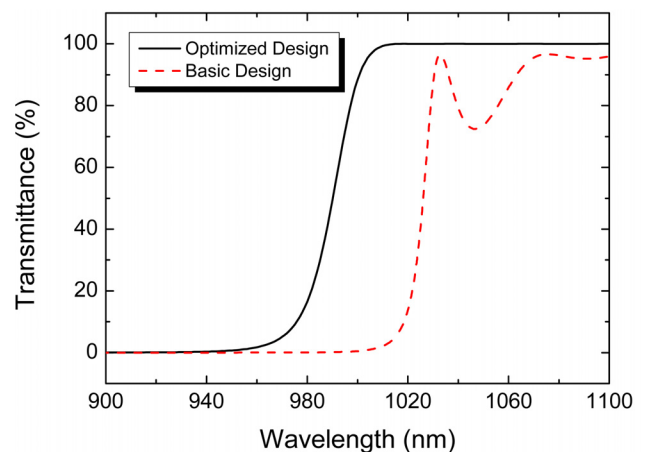


FIG. 2. Transmittance graphs of the basic design and the optimized design of the LPF.

므로 안정적으로 잘 설계된 것이라는 것을 알 수 있다.

다음은 LPF가 설계된 기판의 반대쪽 면에서 생기는 반사를 없애주기 위한 AR 코팅의 설계이다. AR 코팅 설계 시 고 반사(H) 물질에는 LPF설계와 마찬가지로 Ta₂O₅, 저반사(L) 물질에는 SiO₂를 사용하여 2층으로 설계하였다. 그 밖에 모든 설계조건은 LPF와 동일한 기준을 적용하였다. 패키징된 반사형 2색 필터로 제작하기 위해서 1020 nm~1100 nm 사이 투과율도 LPF의 조건과 동일하게 99.9%이상으로 투과되게 목표치를 정하고 설계를 하였다.

Fig. 4는 AR 코팅 설계에 따른 최종적인 투과율 그래프와 에러를 반영한 그래프이다. 그래프 파형을 보면 알 수 있듯이 목표치인 1020 nm~1100 nm 대역에서 99.9% 이상의 투과율을 가지는 것을 확인할 수 있다. LPF 설계에서와 마찬가지로 여기서도 전산모의 기능을 이용하여 코팅 과정 중에 발생할 수 있는 오차를 LPF 설계조건과 동일하게 지정해 나온 무작위 5개의 그래프 파형을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 5개의 파형 모두 목표 기준치에 벗어나지 않아 안정적이고 잘 설계된 것임을 확인할 수 있다.

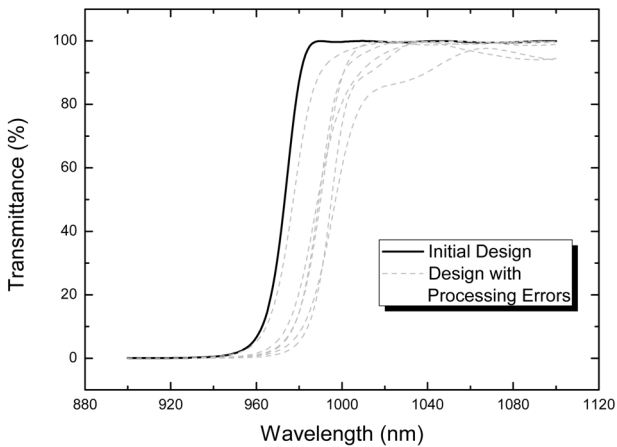


FIG. 3. Transmittance graphs of the LPF designs with processing errors compared with the initial design.

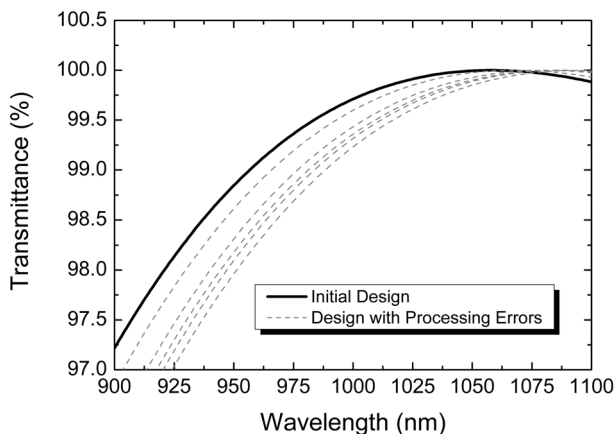


FIG. 4. Transmittance graphs of the AR coating designs with processing errors compared with the initial design.

III. 반사형 펌프보호기용 2색 필터의 제작

SiO₂/Ta₂O₅ 다층박막 2색 필터의 설계에 따라서, 챔버 크기가 800 mm인 박스형 전자빔 증착기(HVC800DA, (주)한일진공기계)에서 이온빔 보조 증착방법을 이용하여 필터를 증착하였으며, 이 때 SiO₂ 박막은 60 nm/min의 증착속도로 증착하였으며 그 위에 0.3 nm/min의 증착속도로 Ta₂O₅ 박막을 증착하여 제작하였다.

Fig. 5는 제작된 필터와 설계를 비교한 투과율 그래프이다. 905~925 nm 파장대역에서는 비교적 설계 목표치와 비슷하게 나옴을 확인할 수 있다. 하지만 1020~1100 nm 파장대역에서는 1020 nm 부근에서 최소 95.52%의 투과율을 나타내었다. 또한, 전체적인 투과율 그래프 곡선도 설계치보다 완만하게 나타났다. 이는 실제 제작 공정에 있어서 박막의 물리 두께의 차이, 박막을 쌓을 때 조밀도의 변화에 의한 굴절률 차이에 따른 오차로 인해 투과 특성이 변했지만, Fig. 3에서 고려했던 오차범위 안으로 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 제작된 필터의 고출력 레이저 광에서의 동작특성을 실험하기 위한 실험장치도이다. 광원으로는 1084 nm의 고출력 광섬유 레이저를 사용하였다. 사용된 광원의 출력 광섬유는 다중모드로서 코아 직경은 105 μm였다. 필터에 입사를 시킬 때 입사각이 0°이면 반사광이 돌아와 손상을 줄 수 있기 때문에 입사각을 2°로 고정하였다. 레이저의 출력을 증가시키면서 제작된 필터의 동작특성을 관측한 결과 1W이상의 고출력에서도 정상 동작하다가 1.5W 부근에서 필터가 파

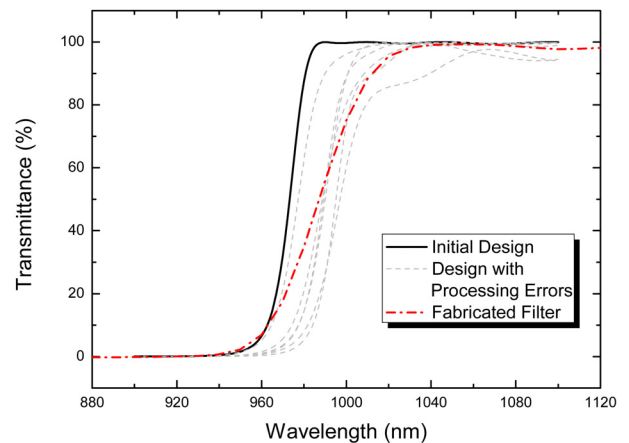


FIG. 5. Transmittance graphs of the fabricated filter compared with the initial design and processing errors.

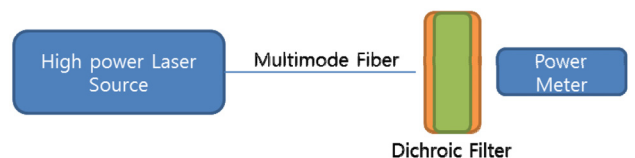


FIG. 6. Experimental setup for investigating the high power laser operation characteristics of the fabricated filter.

괴되는 것을 확인하여 레이저 손상문턱(Damage Threshold)는 $1.5W/[\pi(50.25 \mu\text{m})^2]= 18.9 \text{ kW/cm}^2$ 으로 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유 레이저용 반사형 2색 필터를 제작하고, 그 특성을 측정하였다. 반사형 2색 필터는 기판으로 SiO₂를 사용하였고, 고굴절률 물질로 Ta₂O₅, 저굴절률 물질로 SiO₂를 사용하여 설계하였다. LPF는 900 nm의 기준파장으로 34층으로 설계하였고, AR 코팅은 같은 기준파장에 2층으로 설계하였다. 설계 시, LPF와 AR 코팅은 목표 기준치에 적합하게 나옴을 확인하였다. 그 후에 이온 보조 전자빔 증착기를 이용하여 반사형 2색 필터를 제작하였다. 905~925 nm 파장대역에서는 목표 기준치에 맞게 나왔고, 1020~1100 nm 파장대역에서는 최소 95.52%의 투과 특성이 나타났다. 이는 제작할 때의 오차, 즉 박막의 물리 두께에 의한 차이, 조밀도, 굴절률에 따른 오차로 인한 것으로 판단된다. 고출력 광섬유 레이저를 이용하여 실험한 결과 레이저 출력 1W이상에서도 정상 동작함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업 (정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10039226, EUV 마스크 actinic 검사장비 및 멀티 전자빔 웨이퍼 검사기술개발]

References

1. Y. J. Park, J. H. Park, Y. M. Hwang, Y. H. Kim, J. H. Lee, and S. H. Lee, "Design and fabrication of dichroic mirror and broadband H/R mirror for color separation," *J. Opt. Soc. Korea* **8**, 183-188 (1997).
2. J. D. Rancourt, *Optical Thin Films : Users' Hand Book* (McGraw-Hill, NY, USA, 1987).
3. C. C. Lee, "Optical thin film and deposition technology," Japanese Edition Agne Technical Center (2002).
4. J. Nilsson, J. K. Sahu, Y. Jeong, W. A. Clarkson, R. Selvas, A. B. Grudinin, and S. Alam, "High power fiber lasers: new developments," *Proc. SPIE* **4974**, 50-59 (2003).
5. J. Nilsson, "High power fiber lasers: fundamentals and frontiers," *Lasers, Sources and Related Photonics Devices, AT1A.1* (2012).
6. H. A. Macleod, *Thin-film Optical Filters*, 2nd ed (Macmillan, NY, USA, 1986).
7. S. H. Woo, Y. B. Son, I. C. Moon, G. M. Kang, K. S. Lee, and C. K. Hwangbo, "Optical properties of Ta₂O₅ thin films deposited by plasma ion-assisted deposition," *J. Phys. Soc. Korea* **46**, 187-191 (2005).
8. S. G. Yoon, S. M. Kang, and D. H. Yoon, "Residual stress and optical properties in a post-annealed Ta₂O₅/SiO₂ multilayer prepared by using dual-ion beam sputtering," *J. Phys. Soc. Korea* **49**, 237-240 (2006).
9. S. H. Oh, W. Y. Choi, and Y. M. Jhon, "Design and fabrication characteristics of filters for pump LD protectors for high-power fiber lasers," *Sae Mulli (The Korean Physical Society)* **59**, 111-117 (2009).
10. H. M. Sung, H. S. Ryu, J. H. Kim, D. H. Woo, S. Lee, J. H. Lee, and Y. M. Jhon, "Design of dichroic reflection filters for fiber lasers using Ta₂O₅/SiO₂ thin films," in *Proc. 19th Photonics Conference* (Hyundai Sungwoo Resort, Hoeng Seong, Korea, 2010), TP-14.