

고출력 광섬유 레이저용 2색 필터  
펌프보호기 개발

연세대학교 대학원

전기전자공학과

오 승 호

고출력 광섬유 레이저용 2색 필터  
펌프보호기 개발

지도교수 최 우 영 · 전 영 민

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2009년 7월 일

연세대학교 대학원

전기전자공학과

오 승 호

# 오승호의 석사 학위논문을 인준함

심사위원           최 우 영           인

심사위원           한 상 국           인

심사위원           전 영 민           인

연세대학교 대학원

2009년 7월 일

# 차 례

감사의 글	ii
그림 차례	iv
표 차례	v
국문 요약	vi
제 1 장 서론	1
제 2 장 광학박막의 설계 이론	3
2-1. 장·단파장 투과필터	3
2-2. 무반사 코팅	6
제 3 장 실험과정 및 방법	8
3-1. 펌프보호기용 필터 설계	8
3-1-1. 단파장 투과필터(SPF)설계	8
3-1-2. 무반사 코팅 설계	16
제 4 장 실험 결과	24
4-1. 제작된 펌프보호기용 필터의 특성 측정 및 분석	24
4-1-1. SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )의 제작과 특성 측정 및 분석	24
4-1-2. SPF( $Ta_2O_5/SiO_2$ )의 제작과 특성 측정 및 분석	25
4-2. 제작된 필터의 고출력 특성	27
제 5 장 결 론	30
참고 문헌	31
영문 요약	34

## 감사의 글

어느덧 석사 2년 과정의 시간이 흘러 졸업을 앞두고 되었습니다. 지난 2년간의 시간을 되돌아보면 시행착오도 많았고 부족함도 많아 아쉬움이 크게 남습니다. 하지만 이런 저의 부족한 부분들을 무한한 관심과 애정, 아낌 없는 조언으로 채워주시고자 하신 분들에 대한 감사의 마음을 표현하고자 합니다.

무엇보다도 변함없는 믿음과 아낌없는 사랑으로 항상 제 편에서 생각해주시고 이끌어 주어 지금의 저를 있게 해주신 사랑하는 어머니와 친 누나인 민희누나, 민정누나 그리고 언제나 든든한 우리 매형께 감사하다는 말을 전합니다.

그리고 학업 공부를 하면서 아주 세세한 부분까지도 세심한 지도와 배려로 하나라도 더 가르침을 주시려 노력하시고 격려해주시며 지도해 주신 KIST 지도교수님이신 전영민 박사님께 깊고 깊은 감사를 드립니다. 또한 연세대학교의 지도교수님이신 최우영 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 학교에 자주 찾아 뵙지 못했음에도 불구하고 항상 반갑게 맞아주시고, 아낌없는 조언과 격려로 이끌어 주신 것에 감사 드립니다. 바쁜 일정에도 불구하고 논문심사를 위해 시간을 할애해 주신 한상국 교수님께도 감사 드립니다. 또한 KIST에서 연구에 정진할 수 있도록 도와주신 이석 박사님, 우덕하 박사님, 변영태 박사님께도 감사 드립니다.

KIST 생활을 함에 있어서 항상 자기 일처럼 많은 도움을 주신 지웅이형, 경선이형, 수현형, 용우씨, 동욱씨, 경현, 하민, 유미, 영주씨에게도 감사 드립니다.

언제나 힘들다고 투덜대도 묵묵히 술 한잔 기울이면서 힘내라고 격려해준 친구 우수, 민철, 호영, 커피친구 성수 그리고 같은 과 대학교 선후배, 동기생인 재동, 장호, 성근, 주민, 정현이형, 상현이형, 용봉이형, 동우형, 건용, 창근, 진문, 종관, 태영, 소영 등 모든 분들께도 감사의 마음을 전합니다. 또 우리 프랜즈 팩토리 친구들 상미, 자영, 순복, 승주, 승훈, 효주, 동철, 경돈, 창환, 경미, 유제, 문정, 지현, 그리고 분야

는 다르지만 이번에 같이 석사논문 쓰면서 많은 격려와 위로로 힘이 되어준 지은 누나 등등 모든 멤버들 그리고 그 누구보다도 항상 옆에서 묵묵히 힘이 되어주고 변함 없는 사랑으로 항상 곁을 지켜준 사랑하는 여자친구 애진에게 감사의 마음을 전하고 동생 수진과 애진 부모님께도 깊은 감사를 드립니다.

여기에 일일이 이름을 나열할 수는 없지만, 제가 이제껏 살아오면서 도움을 받았던 모든 분들께 머리 숙여 감사 드립니다.

이제는 또 다른 시작을 하려 합니다. 지금까지 보내주신 성원과 격려에 감사 드리고 여기가 끝이 아닌, 앞으로도 많은 관심과 애정 어린 조언을 부탁드립니다. 항상 건강하시고 하시는 일 모두 잘 되길 기원하겠습니다.

## 그림 차례

그림 3.1 제안된 2색 필터 설계 구조	8
그림 3.2 펌프 보호기용 Filter 설계과정	12
그림 3.3 펌프보호기용 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )설계의 투과율 곡선	13
그림 3.4 RunSheet & Simulator 를 이용한 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )의 특성분석	15
그림 3.5 무반사 코팅( $ZrO_2/SiO_2$ ) 설계의 투과율 곡선	16
그림 3.6 RunSheet & Simulator를 이용한 무반사 코팅( $ZrO_2/SiO_2$ ) 특성분석	18
그림 3.7 펌프 보호기용 SPF( $Ta_2O_5/SiO_2$ )설계의 투과율 곡선	21
그림 3.8 RunSheet & Simulator를 이용한 SPF( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) 특성분석	21
그림 3.9 무반사 코팅( $Ta_2O_5/SiO_2$ )설계의 투과율 곡선	22
그림 3.10 RunSheet & Simulator를 이용한 무반사 코팅( $Ta_2O_5/SiO_2$ )의 특성분석	23
그림 4.1 이온 보조 전자빔 증착기	24
그림 4.2 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )필터의 설계 및 제작 특성 비교	25
그림 4.3 SPF( $Ta_2O_5/SiO_2$ )필터의 설계 및 제작 특성 비교	26
그림 4.4 고효율 광섬유 레이저에서의 특성 측정 실험 장치도 사진	29

## 표 차례

표 3.1 고출력 1064nm에서의 $ZrO_2$ , $HfO_2$ 와 $Ta_2O_5$ 의 LIDT(Laser Induced Damage Threshold)비교 표	10
표 3.2 펌프 보호기용 SPF 32층 ( $ZrO_2/SiO_2$ ) Design Table	11
표 3.3 펌프 보호기용 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )설계의 투과율 표	14
표 3.4 무반사 코팅( $ZrO_2/SiO_2$ )설계의 투과율 표	17
표 3.5 펌프보호기용 SPF 32층( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) Design Table	19
표 3.6 펌프 보호기용 SPF( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) 투과율 표	20
표 3.7 무반사 코팅( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) 투과율 표	22
표 4.1 고출력 특성 측정 실험에 사용된 레이저의 동작 특성	28



## 국 문 요 약

### 고출력 광섬유 레이저용 2색 필터 펌프 보호기 개발

최근 들어 광섬유 레이저의 수요가 기존의 초고속 통신용에서 고출력 가공용으로 이동하고 있으며, 이러한 고출력 광섬유 레이저는 고정밀, 고성능, 고속가공의 장점을 가지고 마이크로 전자산업의 광원과 다단적층형 차세대 메모리 반도체 공정, 레이저 절단기, 용접기 등 다양한 응용장비에 사용될 것으로 기대되고 있다. 하지만, 레이저 출력의 강도가 고출력이기 때문에 반사광이나 브릴루앙 산란광에 의해 역입사하는 광에 의해 펌핑용 레이저 다이오드(LD: Laser Diode)가 파괴될 수가 있다.

본 논문에서는 역입사 되는 레이저 광으로부터 펌핑용 LD를 보호하기 위한 2색 필터(Dichroic Filter)를 설계하여 제작한 후, 특성을 측정하였다.

펌프 LD 발진 파장인 905 nm ~ 925 nm 대역에서 투과율을 99.9% 이상으로 투과 시키면서 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장대역인 1020 nm ~ 1100 nm 대역에서의 투과율을 0.1% 이하가 되도록 필터를 설계하였다. 코팅물질의 종류는 사용파장대역에서의 투과율과 흡수계수, 증착속도 등을 고려하여 선택해야 한다. 코팅 물질들간에 굴절률 차가 크고, 동시에 접착력도 강해야 하므로 substrate를 SiO<sub>2</sub>로 하는 경우에는 박막의 접착력이 좋은 Oxide계열 물질을 사용하는 것이 유리하여 SiO<sub>2</sub>와 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 사용하였다. Oxide물질 중 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>보다 ZrO<sub>2</sub>가 LIDT(Laser Induced Damage Threshold)가 더 높아 고출력에서의 사용에 유리하다. 이는 패키징하여 제작 할 때 작게 만들어져야 하는데 이때 beam size역시 작아져 LIDT에 영향을 주게 된다. 따라서 효율적인 측면에서 좀 더 유리한 ZrO<sub>2</sub>를 이용하여 추가로 설계를 하게 되었다. 2색 필터의 한 쪽 면에는

SPF(Short Pass Filter)를, 반대쪽 면에는 무반사(AR: Anti-Reflection)코팅을 설계하였다. 여기에서의 AR 코팅은 펌핑용 LD에서 나온 빛이 반사를 하여 LD로 역입사하여 레이저의 발진을 불안정 하게 하거나 오동작을 일으키는 것을 막고 보호하기 위해 설계하였다.

본 설계를 위해서 Essential Macleod Program을 이용하여 설계를 하였다. 프로그램 순서는 기준 파장을 정하고 원하는 층수를 쌓은 다음 원하는 파장대 영역의 기준에 최대한 맞춰 설계해 내는 과정을 가진다. 설계가 끝나면 이 설계를 실제로 만들기 전에 RunSheet & Simulator를 이용하여 장비특성, 증착오차, 증착조건 및 오퍼레이터 특성의 오차율(약 1%)을 반영한 설계곡선을 실제 생산에 예상 수율 산출을 가능하게 한다.

이렇게 설계된 필터( $ZrO_2/SiO_2$ )를 측정해 본 결과 1020 nm ~ 1100 nm에서는 0.63% ~ 0.01%의 투과율을 보여 설계치 와 비슷한 결과를 얻었고, 905 nm ~ 925 nm에서의 투과율은 설계했을 때 예상했던 수치보다 2% ~ 3%의 오차율이 발생함을 확인하였다. 이는 공정 시, 여러 개의 층으로 쌓아서 필터를 설계해야 하기 때문에 물질을 증착 시킬 때 물질의 증착속도나 정밀한 두께(~nm)로 쌓지 못하게 되는 문제점으로 추측된다. 공정상의 문제점을 보완한다면 원하는 제품을 생산하여 수요에 맞게 원활히 공급할 수 있는 의미 있는 산업의 한 분야가 될 것 이라 기대해본다.

-----  
핵심 되는 말: Dichroic Filter, 광섬유, 레이저, Essential Macleod Program,  
SPF(Short Pass Filter), AR(Anti-Reflection)코팅, 투과율, 필터

## 제 1 장 서 론

광학 박막(optical thin films)은 광학 부품의 광학적 특성(파장에 따른 빛의 반사율, 투과율, 흡수율, 편광, 위상 등)을 주어진 목적에 맞게 변화시키는 방법으로 널리 사용되고 있다. 광학 박막이 빛의 간섭효과를 이용한 박막이므로, 광학박막의 두께는 사용하는 빛의 파장 정도 혹은 파장보다 작은 얇은 막이다. 예를 들면, 반사율을 줄이기 위해 카메라와 안경 렌즈에 이용되는 무반사 코팅(AR: Anti-Reflection), 레이저 공명기의 고반사(HR: High Reflection) 거울, 장(단)파장 투과필터 (L(S)PF: Long(Short) Pass Filter), 특정 파장만 투과시키는 간섭필터, 금속 박막의 보호코팅 및 반사율 증가 코팅, 편광된 빛을 편광 방향에 따라 분리시키는 편광 분리기 등이 전통적 광학소자로 사용되고 있다. [1-3]

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 덩어리에 가까운 박막을 제작하고 있으며 박막의 광학적 및 기계적 특성을 향상시키고 있다. 최근에는 초고속 다용량 광 정보통신의 발전, 다양한 성능을 갖는 광학 기기의 빠른 발전, 레이저, 광센서, 광자기술, 광전자 등의 발전에 따라 고품질의 박막을 제작하기 위한 기술이 급속히 발전하고 있다. [4] 특히 광섬유 레이저의 수요가 기존의 초고속 통신용에서 고출력 가공용으로 이동함에 따라 이에 관한 수요에 능동적으로 대처하여 차세대 산업에 대한 준비를 다져 놓아야 할 것이다. 이러한 고출력 광섬유 레이저는 고정밀, 고성능, 고속가공의 장점을 가지고 마이크로 전자산업의 레이저 광원과 다단적층형 차세대 메모리 반도체 공정, 레이저 절단기, 용접기 등

다양한 응용장비에 사용 될 것이다. 하지만, 이러한 분야에 접목시켜 활용하려면 먼저 다양한 코팅 물질의 특성을 파악하여야 한다. 코팅 물질의 종류는 사용파장대역에서의 투과율과, 증착 물질 간 굴절률의 차 등을 고려하여야 한다. 증착 물질들 간 굴절률 차가 큰 것을 이용하고, 또한 증착물질 간 접착력도 우수해야 한다. [5,6] 그리고 레이저의 출력이 고출력이기 때문에 반사광이나 브릴루앙 산란광에 의해 역입사 하는 빛에 의해 펌핑용 레이저 다이오드(LD: Laser Diode)가 파괴 될 수가 있다.

본 논문에서는 역입사 되는 레이저 광으로부터 펌프 LD를 보호하기 위한 2색 필터를 설계하고 제작한 후, 그 특성을 측정하였다. 펌프 LD 발진 파장인 905 nm ~ 925 nm 대역에서 투과율을 99.5% ~ 99.9% 이상으로 투과시키면서 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장대역인 1020 nm ~ 1100 nm 대역에서의 투과율을 0.01% ~ 0.09% 이하가 되도록 필터(SPF)를 설계하였다. 처음에는 제작이 용이하고 기본적 특성이 우수한 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>의 물질을 사용하여 설계하였으나, [8] LIDT(Laser Induced Damage Threshold)가 더 높아 고출력(High Power)에서의 사용에 더 유리한 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>를 추가적으로 설계하였는데 [7-9,17,18,21-25] 이는 상품화를 위하여 패키징 할 때 beam size가 작아져 강도(intensity)가 높아지는 경우를 고려한 것이다. 그 후, ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>와 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>를 각각 사용하여 설계한대로 필터를 제작하였으며, 그 특성을 측정한 후 설계치와 비교 분석하였다. [14,15] 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 SPF와 AR 코팅을 하기 위해서 알아야 할 기본적인 이론을 소개하고, 3장에서는 Essential Macleod Program을 이용한 필터 기본설계를 하고 제작과정에서 발생될 수 있는 오차율을 고려하여 대량 생산 시에 수율을 최대화하여 설계하는 과정에 대해 설명하였다. 4장에서는 제작된 필터와 설계치를 비교하여 특성을 분석하였고, 5장에서는 결론과 향후 연구내용을 기술하였다.

## 제 2 장 광학 박막 설계 이론

### 제 2-1절 장·단파장 투과 필터

특정한 파장보다 긴(짧은) 파장을 투과시키고 짧은(긴) 파장은 반사시키는 장(단)파장 투과 필터의 기본 설계는 1/4 파장 다층 박막의 투과 대역과 반사 대역을 이용한다. 투과와 반사 대역 사이의 경계 파장에 의해 반사와 투과 대역이 나뉘므로 경계(edge) 필터라고 부른다. 색 생성에 필요한 빨강, 초록, 파랑 빛을 만드는데 사용하는 색(color)필터, 이색(dichroic) 거울, 찬(cold) 거울, 더운(hot) 거울 등도 경계 필터의 응용이다. [13, 18]

#### (1) 대칭 박막

일반적으로 장(단)파장 투과 필터는 1/4 파장 다층 박막의 양 끝에 1/8파장 층을 결합층으로 추가하여 설계한다. (H/2 H H/2)과 (L/2 H L/2)의 대칭 구조를 기본 주기로 반복하여

$$\begin{aligned} \frac{H}{2} L \frac{H}{2} \frac{H}{2} L \dots L \frac{H}{2} \frac{H}{2} L \frac{H}{2} &= \frac{H}{2} L H L \dots L H L \frac{H}{2} \\ &= \left( \frac{H}{2} L \frac{H}{2} \right)^S \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} H \frac{L}{2} \frac{L}{2} H \dots H \frac{L}{2} \frac{L}{2} H \frac{L}{2} &= \frac{L}{2} H L H \dots H L H \frac{L}{2} \\ &= \left( \frac{L}{2} H \frac{L}{2} \right)^S \end{aligned} \quad (2-2)$$

과 같은 다층 박막을 사용한다. 수직 입사 때 H 와 L 의 광학 위상 두께는  $\delta_H$

$= \delta_L = \pi g/2$  이다. 대칭층 (H/2 H H/2)의 경우, 바깥의 두 층과 가운데 층의 광학 위상 두께가  $2 \times \delta_H/2 = \delta_L = \delta$  이므로, 등가 박막의 각 성분은

$$M_{11} = M_{22} = \cos^2 \delta - \frac{n_H^2 + n_L^2}{2n_H n_L} \sin^2 \delta \quad (2-3)$$

$$M_{12} = i \frac{\sin \delta}{n_H} \left[ \left( 1 + \frac{n_H^2 + n_L^2}{2n_H n_L} \right) \cos \delta + \frac{n_H^2 - n_L^2}{2n_H n_L} \right] \quad (2-4)$$

$$M_{21} = i n_H \sin \delta \left[ \left( 1 + \frac{n_H^2 + n_L^2}{2n_H n_L} \right) \cos \delta - \frac{n_H^2 - n_L^2}{2n_H n_L} \right] \quad (2-5)$$

이 된다.

(2) 반사 대역과 투과 대역

식  $N_{eq} = (M_{21}/M_{12})^{1/2}$  에서  $M_{12}$  와  $M_{21}$  의 부호가 다르면 등가 어드미턴스는 허수가 된다. 또한  $M_{11} = M_{22}$  이고  $M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} = 1$  이므로

$$|\cos \Delta| = |M_{11}| = \sqrt{1 + |M_{12}M_{21}|} > 1 \quad (2-6)$$

이 되어, 등가 위상도 허수이다.

$g=1$ 일 때  $\delta_H = \delta_L = \pi/2$  이므로 식(2-4)와 식(2-5)의 부호가 다르다. 따라서 등가 굴절률(등가 어드미턴스)  $N_{eq}$  은

$$N'_{eq} = -iN_{eq} \quad (2-7)$$

로 허수이다. 식(2-3)으로부터  $M_{11} = -(n_H^2 + n_L^2)/2n_H n_L$  이며,  $n_H^2 + n_L^2 > 2n_H n_L$  이므로  $M_{11} > 1$  이다. 따라서 등가 위상  $\Delta'$  은

$$\Delta' = -i\Delta \quad (2-8)$$

로 허수가 된다.  $N_{eq}$  과  $\Delta'$  이 허수이므로 (H/2 H H/2)<sup>2</sup>의 특성 행렬은

$$[M] = \begin{bmatrix} \cosh S\Delta & i \frac{\sinh S\Delta}{N_{eq}} \\ -iN_{eq} \sinh S\Delta & \cosh S\Delta \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

가 된다.

기판의 굴절률이  $n_{sub}$  일 때 투과율 T는

$$T = \frac{\text{Re}(Y_{sub})}{Y_0} |\tau|^2 = \frac{4Y_0 \text{Re}(Y_{sub})}{(Y_0 B + C)(Y_0 B + C)}$$

$$T = \frac{4n_0 n_{sub}}{(n_0 + n_{sub})^2 + \left[ \left( \frac{n_0 n_{sub}}{N_{eq}} - N_{eq} \right)^2 + (n_0 + n_{sub})^2 \right] \sinh^2 S\Delta} \quad (2-10)$$

가 된다. S가 증가하면  $\sin S\Delta$ 가 매우 커지고  $T \rightarrow 0$  이므로, 등가 굴절률과 등가 위상이 허수인 파장 구간은 반사율이 높은 반사 대역이다.

$g=0$  이면 식(2-4)와 식(2-5)로부터  $N_{eq} = (n_H n_L)^{1/2}$  이고  $\Delta = 0$  이다.  $g=2$ 이면  $\delta_H = \delta_L = \pi$  이므로  $N_{eq} = n_H (n_H n_L)^{1/2}$  이고  $\Delta = 2\pi$  이다.  $M_{12}$  와  $M_{21}$  의 부호가 같으면  $N_{eq}$  와  $\Delta$  가 실수이므로  $(H/2 \ L \ H/2)^S$  의 특성 행렬은

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos S\Delta & i \frac{\sin S\Delta}{N_{eq}} \\ iN_{eq} \sin S\Delta & \cos S\Delta \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

가 된다. 이 때 투과율 T는

$$T = \frac{4n_0 n_{sub}}{(n_0 + n_{sub})^2 + \left[ \left( \frac{n_0 n_{sub}}{N_{eq}} + N_{eq} \right)^2 - (n_0 + n_{sub})^2 \right] \sin^2 S\Delta} \quad (2-12)$$

가 된다. T의 사인 함수가 최대와 최소 사이를 진동하므로  $N_{eq}$  와  $\Delta$  가 실수인 파장 대역은 투과율이 높은 투과 대역이다. [20]

## 제 2-2절 무반사 코팅

기판의 반사율을 줄이는 무반사(antireflection) 코팅은 가장 많이 사용하는 코팅이다. 광학 박막에서  $R=0$  의 무반사 코팅 조건은  $Y_0=Y$  이다. 즉 입사 매질의 어드미턴스와 박막의 어드미턴스가 같으면 반사되는 빛이 없다.

### (1) 일층 무반사 코팅

공기 중에서 굴절률이 1.5인 유리의 반사율은 0.04이다. 유리 기판을 일층 코팅하여 반사율을 줄이기 위해서는 박막의 굴절률이 기판보다 작아야 한다.  $R=0$ 이기 위해서 박막의 어드미턴스는 기판 어드미턴스인  $(1.5, 0)$ 을 출발하여 공기의 어드미턴스인  $(1, 0)$ 에 도착해야 한다. 어드미턴스  $(1.5, 0)$ 과  $(1, 0)$ 을 이어 주는 반원으로부터 무반사 코팅 박막의 굴절률은  $(1.5 \times 1.0)^{1/2}$ 이고 광학 두께는  $1/4$  파장이어야 한다. 즉 굴절률이 1.22인 박막이 필요하나 이렇게 낮은 굴절률로서 열 증발 증착 시키기에 안정한 박막이 존재하지 않는다. 가시 광선 대역에서 유리 기판보다 굴절률이 낮은 박막으로는  $\text{NaAlF}_6$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  등이 있다.  $\text{NaAlF}_6$ 는 굴절률이 1.35로 매우 낮으나 흡습성(hygroscopic) 물질이다.  $\text{MgF}_2$ 는 굴절률이 1.38이고 기판 온도가 약  $300^\circ\text{C}$ 일 때 접착력이 높아 무반사 코팅 박막으로 이용하고 있으며 두꺼울 때 응력이 크다.  $\text{SiO}_2$ 는 굴절률이 1.46이며, [공기/L/유리]는  $R=0.03$ 으로 반사율을 많이 줄이지 못하나, 기계적 특성이 좋으며 기판 온도를 낮출 수 있어 많이 사용하고 있다.

### (2) 이층 무반사 코팅

반사율을 0으로 하기 위해서는  $\text{SiO}_2$ 박막의 어드미턴스가 공기 어드미턴스인



(1, 0)에 도착하여야 한다. 일층으로는 어려우므로 1/4 파장 광학 두께의 이층 무반사 코팅을 이용하자. (1, 0)으로부터 역으로 1/4 파장 광학 두께  $\text{SiO}_2$ 의 어드미턴스 궤적을 추적하면  $(1.46^2, 0)$ 에 도착한다. 즉  $\text{SiO}_2$ 는  $(2.13, 0)$ 에서 출발하여야 (1, 0)에 도착할 수 있다. 한편  $(2.13, 0)$ 에서 유리의 어드미턴스인  $(1.5, 0)$ 에 도착하기 위해서는 굴절률이  $(1.5 \times 2.13)^{1/2} = 1.79$ 인 1/4 파장 광학 두께 박막이 필요하다.

[공기/LM/유리] 와 같이 중간 굴절률(M)로 1.79인  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 를 1/4 파장 유리 기판 위에 증착하고,  $\text{SiO}_2$ 를 그 위에 증착하면 기준 파장에 대해  $R=0$ 인 무반사 코팅을 할 수 있다. 기준 파장에서만 반사율이 0이고 주위에서는 반사율이 증가하여 이를 “V-코팅” 이라 부른다. [13, 19, 20]

## 제 3 장 실험 과정 및 방법

### 제 3-1절 펌프보호기용 필터 설계

#### 3-1-1. 단파장 투과필터(SPF) 설계

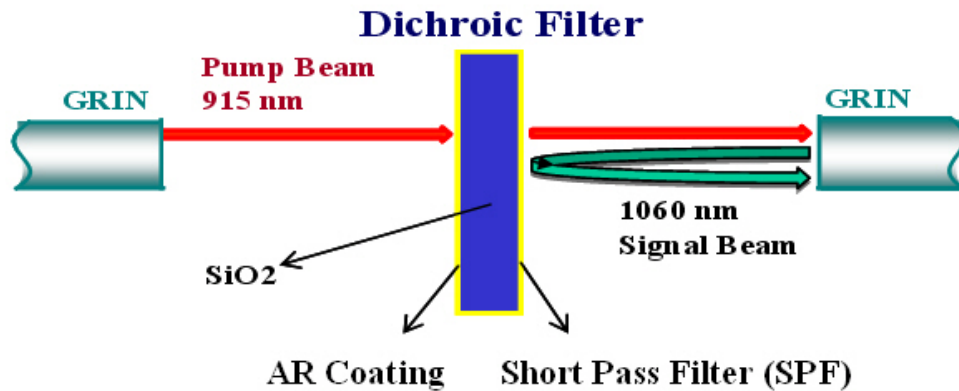


그림 3.1 제안된 2색 필터 설계 구조

본 논문에서는 펌프 LD 발진 파장인 905 nm ~ 925 nm 대역에서 투과율을 99.5% ~ 99.9% 이상으로 투과(SPF)시키면서 광섬유 레이저 출력 반사광이나 브릴루앙 산란광 파장대역인 1020 nm ~ 1100 nm 대역에서의 투과율을 0.01% ~ 0.09% 이하가 되도록 SPF를 설계하였다. 그림 3.1은 제안된 필터의 설계 구조의 그림이다. 2색 필터(Dichroic Filter)의 한 쪽 면에는 SPF를, 반대쪽 면에는 무반사(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 필터 설계 시, 기본적인 조건은 다음과 동일하다.

Substrate는  $\text{SiO}_2$ , 입사각은  $0^\circ$ , 박막 물질은 고반사 물질(H)인  $\text{ZrO}_2$  와  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , 저반사 물질(L)인  $\text{SiO}_2$ , 기준파장은 1240 nm( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ), 1220 nm( $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ )를 사용하였다. 본 설계를 위해서 Essential Macleod Program을 이용하여 설계를 하였다. 프로그램 순서는 기준 파장을 정하고 원하는 박막 층수를 설정하여 쌓은 다음, 원하는 파장대 영역의 기준에 최대한 맞춰 설계해 내는 과정을 가진다. 설계가 끝나면 이 설계를 바탕으로 실제로 만들기 전에 RunSheet & Simulator 기능을 이용하여 증착과정에서 발생 가능한 오차율을 반영하여 결과를 확인함으로써, 실제 생산에서 수율을 높일 수 있게 한다. 여기까지의 과정이 모든 설계과정이다. 처음에는 제작이 용이하고 기본적 특성이 우수한  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 의 물질을 사용하여 설계하였으나, LIDT가 더 높아 고출력에서의 사용에 더 유리한  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 를 추가적으로 설계하였는데 이는 상품화를 위하여 패키징 할 때 beam size가 작아져 강도가 높아지는 경우를 고려한 것이다. 레이저의 강도가 높아지게 되면 물질의 LIDT가 높아야 고출력에 잘 견디기 때문에  $\text{ZrO}_2$ 를 추가로 설계하였다. 표 3.1 은  $\text{ZrO}_2$  와  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  의 LIDT를 비교한 표이다. 이 표를 보면  $\text{ZrO}_2$  가  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  보다 LIDT가 더 높아 고출력에 유리함을 알 수 있다.  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 를 이용하여 설계 시, 층수는 32층으로 31층의 맨 위 층에  $\text{SiO}_2$ 를 한층 더 올려서 설계를 하였다. 이는 31층으로 했을 때 보다 905 nm ~ 925 nm 에서 보다 더 안정적인 수치와 그래프 파형을 가질 수 있었기 때문이다. (표 3.2 참조)

다음에서는  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 를 이용한 설계 과정을 설명하겠다.  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 는  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 와 설계과정이 동일하기 때문이다. 3장의 맨 마지막 부분에  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  설계 관련 그림(3.7~3.10)과 표(3.5~3.7)를 첨부하였다.

Reference	Material	Pulse width	LIDT(Laser Induced Damage Threshold)(J/cm <sup>2</sup> )	
			as-deposited	annealed
[23]	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7ns	12	21
	HfO <sub>2</sub>	7ns	11	28
[24]	ZrO <sub>2</sub>	3ns	25-30	-
	HfO <sub>2</sub>	3ns	12-15	-

표 3.1 고출력 1064nm 파장에서의 ZrO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub> 와 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의

LIDT (Laser Induced Damage Threshold) 비교 표

Incident Angle (deg)			0	
Reference Wavelength (nm)			1220	
Layer	Material	Refractive index	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness(nm)
medium	Air	1		
1	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.28669822	241.58
2	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.73405827	440.07
3	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.21332594	179.76
4	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.24302632	145.7
5	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.2059015	173.5
6	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.23059126	138.24
7	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.61760039	520.41
8	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.6009251	360.26
9	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.21263693	179.18
10	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.19800665	118.71
11	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.22387944	188.65
12	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.22400865	134.3
13	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.22897037	192.94
14	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.22434782	134.5
15	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.22005583	185.43
16	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.20070236	120.32
17	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.21023255	177.15
18	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.20487085	122.82
19	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.23015043	193.93
20	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.23499001	140.88
21	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.22849139	192.54
22	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.20264351	121.49
23	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.21001835	176.97
24	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.20493182	122.86
25	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.23426722	197.4
26	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.23167591	138.89
27	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.62295502	524.92
28	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.20487824	122.83
29	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.20831025	175.53
30	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.24823973	148.82
31	SiO <sub>2</sub>	1.44784	0.26062565	219.61
32	ZrO <sub>2</sub>	2.35	0.28217884	169.17
Substrate	SiO <sub>2</sub>	1.44784		
Total			8.8841948	6399.35

표 3.2 펌프 보호기용 SPF 32층(ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>) Design Table

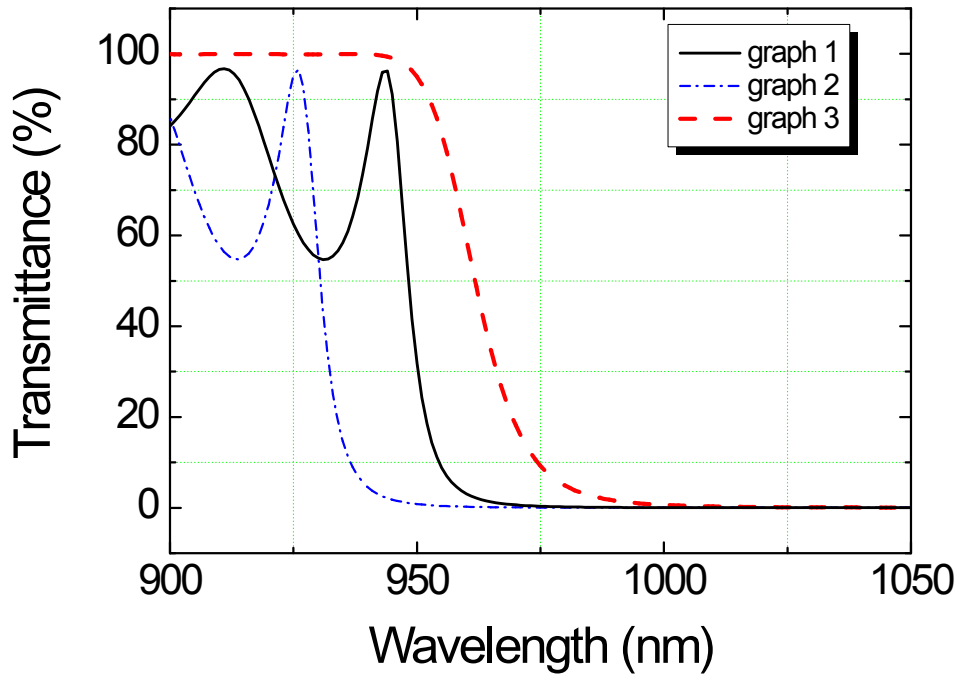


그림 3.2 펌프 보호기용 Filter 설계 과정: 1. HR 설계 (graph1), 2. 기준파장이동 (graph2), 3. flattening(ripple제거, graph3).

그리고 처음 설계한 설계치를 최종 설계로 변환하는 과정은 그림 3.2의 그래프로 설명하겠다. 우선 검정색(graph 1)실선 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)일점 쇄선 그래프이다. 기준파장을 변화시킨 후 최대한 범위를 넓혀 890 nm ~ 940 nm사이에 투과율을 99.9 % 이상으로 정하고 Ripple 제거를 시키게 되면

최종적인 빨간색(graph 3) 점선 그래프를 얻을 수 있다.

여기에선 Ripple이 제거되는 과정을 설명하기 위해 좀 더 넓은 영역대의 파장영역을 포함시켰다.

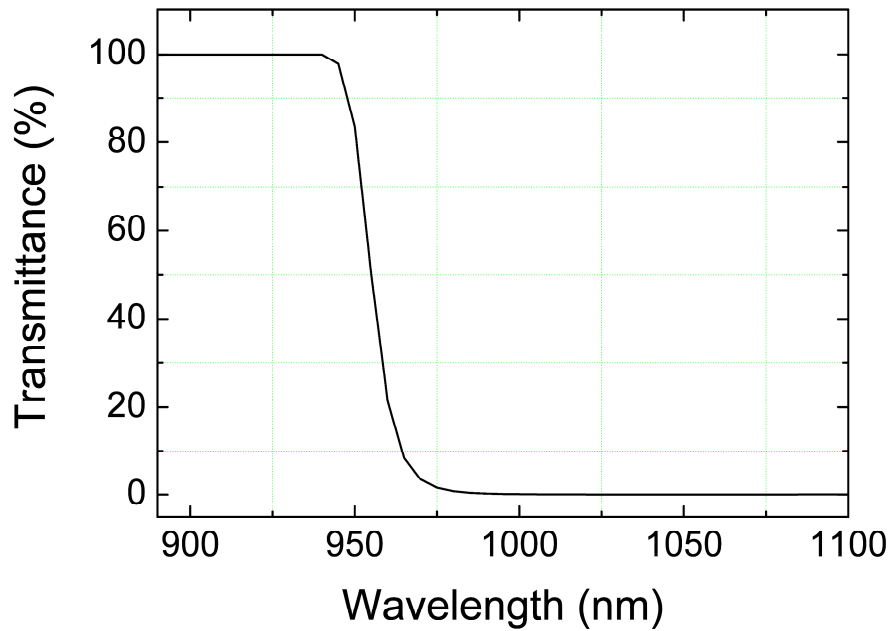


그림 3.3 펌프보호기용 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )설계의 투과율 곡선

그림 3.3은 Ripple이 제거된 최적화된 최종적인 그래프 파형이다. 이 그래프를 보면 우리가 원하는 파장 영역대의 목표치를 만족시키고 있음을 알 수 있다. 보다 정확한 투과율 값을 알아보기 위해 표 3.3의 투과율 표를 참조하겠다.

<i>Wavelength (nm)</i>	<i>Reflectance (%)</i>	<i>Transmittance (%)</i>
900	0.03	99.97
905	0.02	99.98
910	0.01	99.99
915	0.02	99.98
920	0.02	99.98
925	0.01	99.99
...	...	...
1020	99.97	0.03
1025	99.97	0.03
1030	99.98	0.02
1035	99.98	0.02
1040	99.98	0.02
1045	99.98	0.02
1050	99.98	0.02
1055	99.98	0.02
1060	99.98	0.02
1065	99.98	0.02
1070	99.98	0.02
1075	99.98	0.02
1080	99.97	0.03
1085	99.97	0.03
1090	99.96	0.04
1095	99.95	0.05
1100	99.93	0.07

표 3.3 펄프 보호기용 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )설계의 투과율 표



표 3.3을 보면 알 수 있듯이 905 nm ~ 925 nm 에서 투과율은 99.5% 이상이 되었으며, 1020 nm ~ 1080 nm 에서 투과율은 0.1% 이하가 됨을 확인 하였다. 이렇게 설계한 최종 설계치를 제품으로 생산하기 전에 RunSheet & Simulator 기능을 이용하여 장비특성, 증착오차, 증착조건 및 오퍼레이터의 특성을 반영하여 실제 생산품을 사전에 분석하여 생산시간과 원가를 절감 할 수 있는 제조 설계를 할 수 있다. RunSheet & Simulator 과정 중 각 물질들에 Material Mean Error(각 층에 물질의 평균 Error율 0.01(1%), Material Standard Deviation(1차 증착, 2차 증착에 따른 Error율 0.01(1%)), Layer Mean Error(층별 평균 Error율 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.

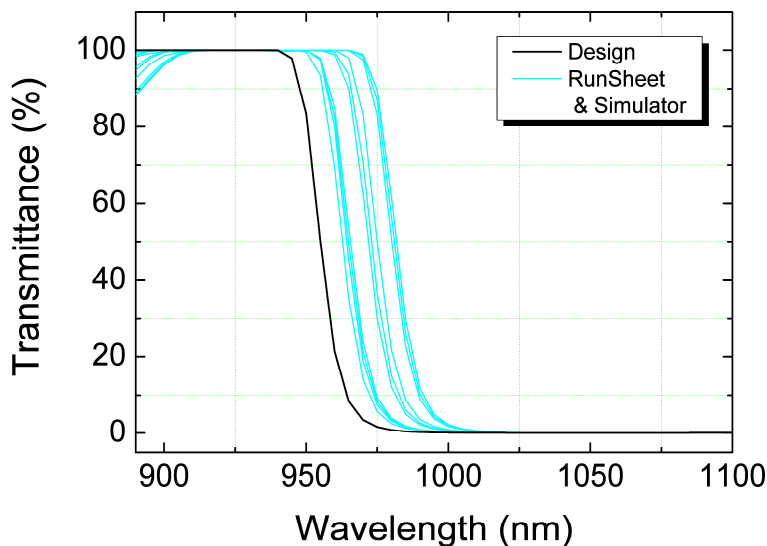


그림 3.4 RunSheet & Simulator를 이용한 SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )의 특성분석

그림 3.4는 실제 코팅과정에서 예상치 못한 오차율을 감안한 경우 가능한

투과율 곡선들이다. 그래프에서 보면 여러 다양한 그래프 파형들을 볼 수 있는데 이는 우리가 만들었던 설계에 오차율을 적용하여 무작위로 10개를 추출해 내서 나타낸 것으로 모든 파형의 그래프들이 우리의 목표 기준치에서 벗어나지 않으므로 안정적으로 설계 된 것이라는 것을 알 수 있다.

### 3-1-2. 무반사 코팅 설계

다음은 SPF가 설계된 substrate의 반대쪽 면에서 생기는 반사를 없애주기 위한 AR코팅 설계이다. 앞서 설계한 SPF와 동일한 물질을 사용하여, H에는  $ZrO_2$ , L에는  $SiO_2$ 를 사용하여 2층으로 설계하였다. 그밖에 모든 설계조건도 동일하게 하였다. 하지만 이 코팅에선 905 nm ~ 925 nm 사이 투과율이 기준이 아닌 반사율을 기준으로 0.1% 이하가 되도록 목표치를 정하였다.

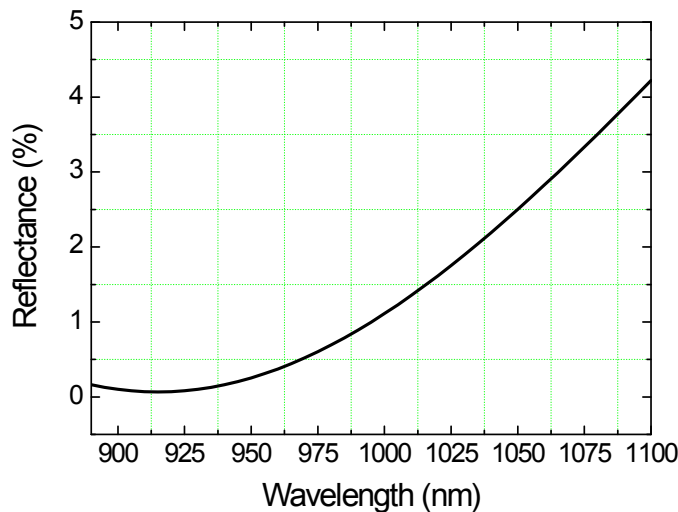


그림 3.5 무반사 코팅 ( $ZrO_2/SiO_2$ )설계의 투과율 곡선

<i>Wavelength (nm)</i>	<i>Reflectance (%)</i>	<i>Transmittance (%)</i>
900	0.037	99.962
905	0.016	99.983
910	0.004	99.995
915	0.000	99.999
920	0.004	99.995
925	0.016	99.983
930	0.037	99.962

표 3.4 무반사 코팅 ( $ZrO_2/SiO_2$ ) 설계의 투과율 표

그림 3.5는 AR코팅 설계에 따른 투과율 그래프이다. 그래프 파형을 보면 알 수 있듯이 목표치인 905 nm ~ 925 nm에서 0.1% 이하의 반사율을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 보다 정확한 반사율 값을 알아보기 위해 표 3.4의 투과율 표를 보면 905 nm ~ 925 nm 에서 반사율이 0.1% 이하가 되는 것을 확인 할 수 있다.

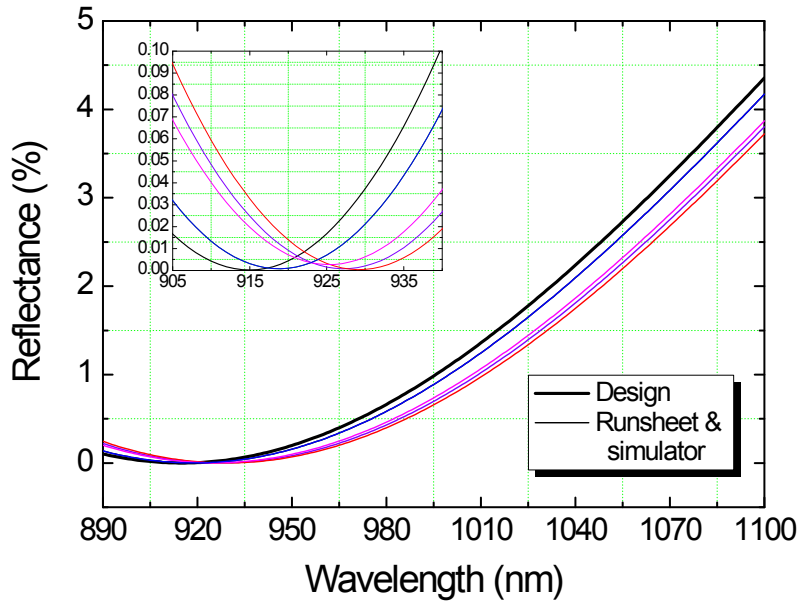


그림 3.6 RunSheet & Simulator를 이용한 무반사 코팅 ( $ZrO_2/SiO_2$ ) 특성분석

SPF 설계에서와 마찬가지로 여기서도 RunSheet & Simulator를 이용하여 코팅 과정 중에 발생할 수 있는 오차를 1% (SPF와 동일조건 오차율 적용)로 지정해 나온 무작위 5개의 파형 그래프가 그림 3.6에 나타나 있다. 여기서도 알 수 있듯이 5개의 그래프가 모두 목표 기준치에 벗어나지 않아 안정적이고 잘 설계된 것임을 확인 할 수 있다.

Incident Angle (deg)			0	
Reference Wavelength (nm)			1240	
Layer	Material	Refractive index	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness(nm)
medium	Air	1		
1	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.09420783	80.7
2	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.27648291	163.26
3	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.20361084	174.41
4	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21423414	126.5
5	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.24561831	210.39
6	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.23794877	140.5
7	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.21829992	186.99
8	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21174145	125.03
9	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.21961817	188.12
10	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.22329999	131.85
11	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.23260058	199.24
12	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21879267	129.19
13	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.21817045	186.88
14	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21126341	124.75
15	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.22007721	188.52
16	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.22324877	131.82
17	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.2283045	195.56
18	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21764877	128.52
19	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.21721707	186.07
20	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21346584	126.05
21	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.22128953	189.55
22	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.22195121	131.06
23	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.23333033	199.87
24	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21647072	127.82
25	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.21682866	185.73
26	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21437072	126.58
27	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.23305962	199.64
28	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.23540487	139
29	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.23108224	197.94
30	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.21522438	127.08
31	SiO <sub>2</sub>	1.44761	0.25371613	217.33
32	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1	0.29096096	171.81
Substrate	SiO <sub>2</sub>	1.44784		
Total			7.12954097	5137.76

표 3.5 펌프로보호기용 SPF 32층(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>) Design Table

<i>Wavelength (nm)</i>	<i>Reflectance (%)</i>	<i>Transmittance (%)</i>
900	0	99.99
905	0.02	99.97
910	0.04	99.95
915	0.04	99.95
920	0.02	99.97
925	0	99.99
...	...	...
1020	99.85	0.14
1025	99.9	0.09
1030	99.93	0.06
1035	99.95	0.04
1040	99.96	0.03
1045	99.97	0.02
1050	99.98	0.01
1055	99.98	0.01
1060	99.98	0.01
1065	99.99	0
1070	99.99	0
1075	99.99	0
1080	99.99	0
1085	99.99	0
1090	99.99	0
1095	99.99	0
1100	99.99	0

표 3.6 펌프 보호기용 SPF ( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ) 설계의 투과율 표

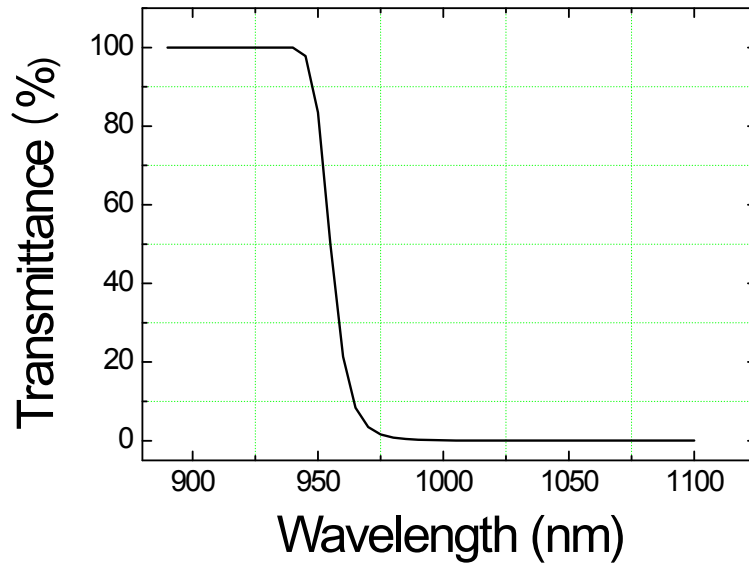


그림 3.7 펌프 보호기용 SPF(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>)설계의 투과율 곡선

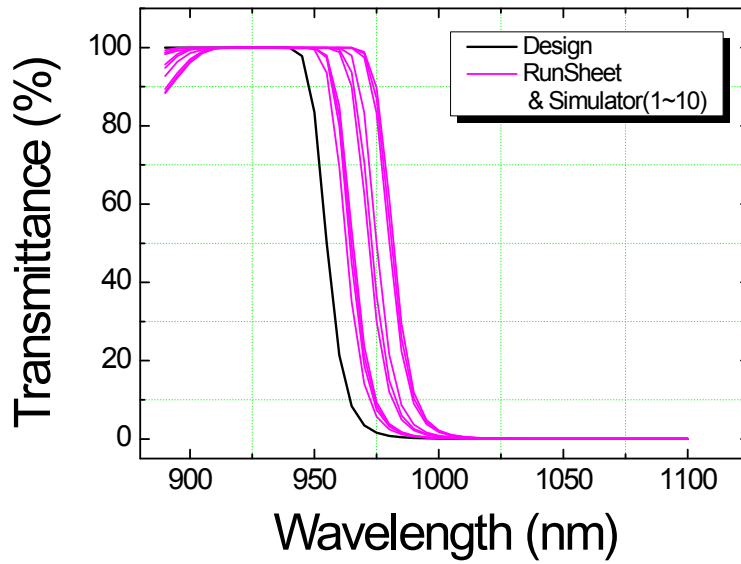


그림 3.8 RunSheet & Simulator를 이용한 SPF(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>) 특성분석

<i>Wavelength</i> (nm)	<i>Reflectance</i> (%)	<i>Transmittance</i> (%)
900	0.07	99.92
905	0.07	99.92
910	0.08	99.91
915	0.1	99.89
920	0.13	99.86
925	0.17	99.82
930	0.21	99.78

표 3.7 무반사 코팅 ( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) 설계의 투과율 표

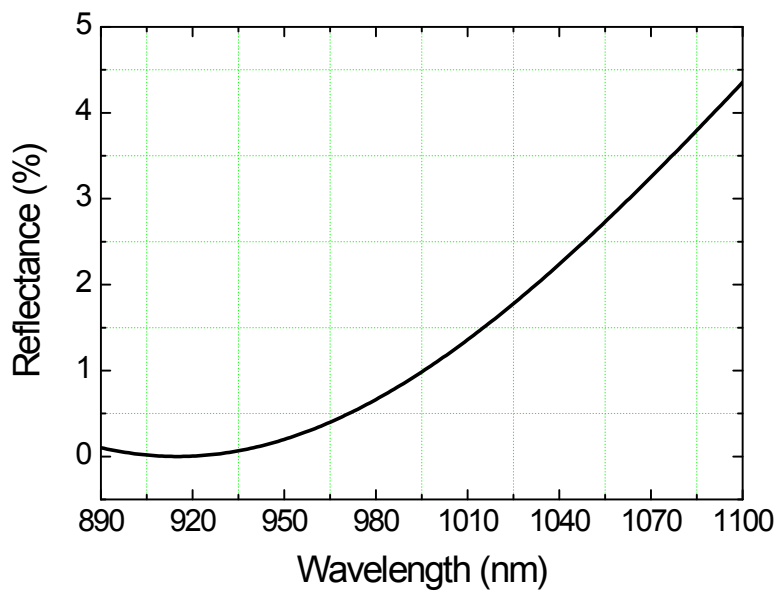


그림 3.9 무반사 코팅 ( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) 설계의 투과율 곡선



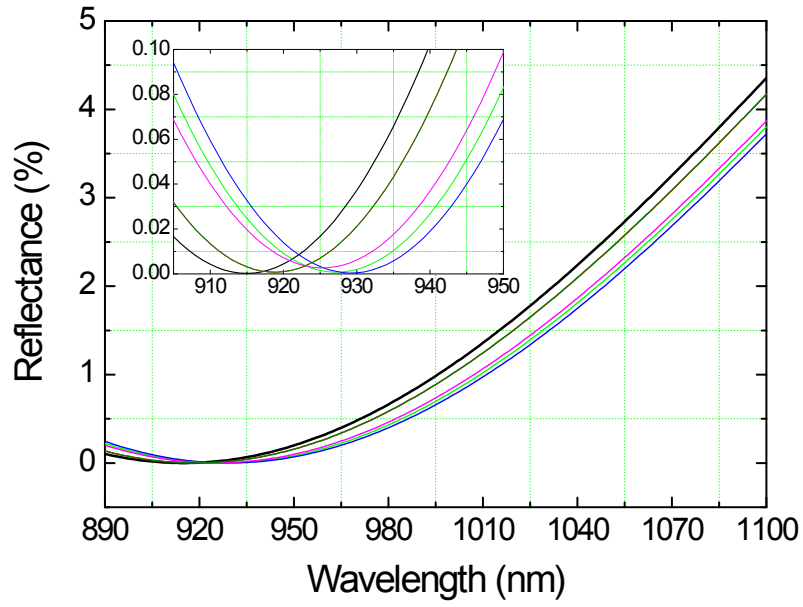


그림 3.10 RunSheet & Simulator를 이용한 무반사 코팅( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ )의 특성분석

## 제 4 장 실험 결과

### 4-1절 제작된 펌프보호기용 필터의 특성 측정 및 분석

#### 4-1-1. SPF( $ZrO_2/SiO_2$ )의 제작과 특성 측정 및 분석

설계된 필터에 따라서 이온보조 전자빔 증착기를 이용해 필터를 증착 하였다. 본 연구에서 사용한 증착용 진공 챔버는 Bell Jar Type이 아닌 Box Type으로서 (주)한일진공기계의 HVC800DA를 이용하여 증착 하였다. 챔버 크기는 800mm 이며 4-segmented basket을 가지고 있다. Electron Beam과 Thermal Source를 사용할 수 있으며, ion source를 이용한 ion-assisted deposition 방법으로 E-beam을 이용하여  $SiO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $ZrO_2$  박막을 증착 하였다. 증착 시  $Ta_2O_5$ 의 증착속도는 0.3 nm/min,  $ZrO_2$ 는 0.5~0.6 nm/min이다(그림 4.1).



그림 4.1 이온 보조 전자빔 증착기

그림 4.2는 미리 설계된  $ZrO_2/SiO_2$ 의 그래프와 실제로 제작하여 그 특성을 측정한 그래프이다. 실제 증착 시 발생 가능한 오차율들을 감안하여 설계했기

때문에 제작된 필터의 광학적 특성을 측정된 결과와 잘 일치하였다. 다만, 단파장 영역에서 반사율이 일부 떨어지는 것은 증착 시 코팅물질이 불균일하게 증착되었고 장비가 가지고 있는 오차와 물질간 두께에 따른 굴절률과 투과율의 차이로 인한 것으로 판단된다.

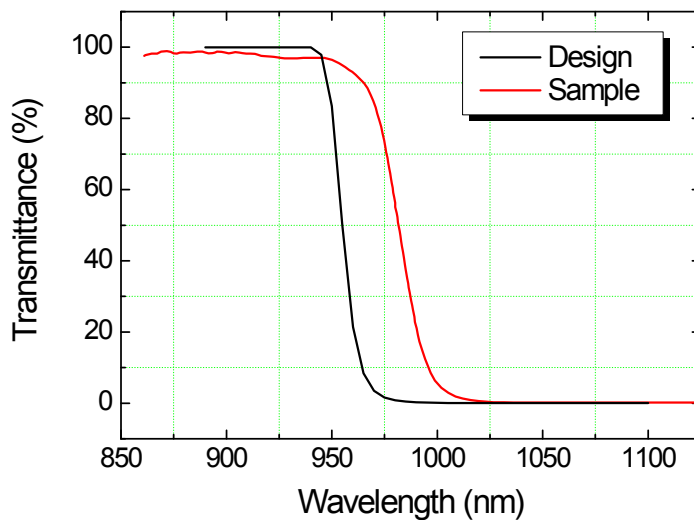


그림 4.2 SPF ( $ZrO_2/SiO_2$ ) 필터의 설계 및 제작 특성 비교

필터 설계 시 905 nm ~ 925 nm 에서 투과율을 99.9% 이상으로 투과시켰으나 실제 제작된 sample 필터의 905 nm ~ 925 nm 에선 96.65% ~ 98.52%로 2% ~ 3%이내의 작은 오차밖에 없었음을 확인했다.

1020 nm ~ 1100 nm 에선 설계 시, 0.1% 이하가 되게 설계하였고, 제작된 필터를 측정해 본 결과 0.01% ~ 0.63%로 약 0.5% 이내의 오차로 안정적인 투과율을 보였다.

#### 4-1-2. SPF ( $Ta_2O_5/SiO_2$ ) 의 제작과 특성 측정 및 분석

그림 4.3는 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>를 이용하여 설계한 그래프와 제작하여 특성을 측정하여 나타낸 그래프를 비교한 것이다. 설계는 905 nm ~ 925 nm 에서 투과율을 99.9% 이상으로 투과시켰으나 실제 제작된 sample 필터의 905 nm ~ 925 nm 에선 95.61% ~ 99.49%로 약 4% ~ 5%의 오차를 확인 할 수 있었다. 1020 nm ~ 1100 nm 에선 0% ~ 0.07%의 투과율을 보여 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 설계처럼 안정적인 투과율을 보였다.

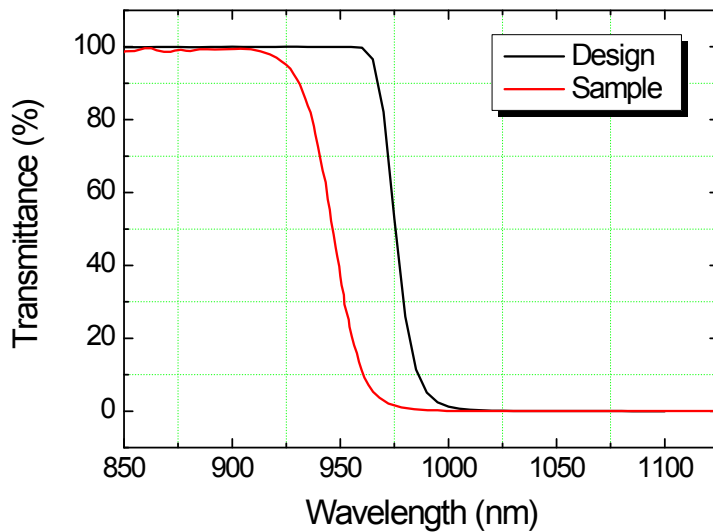


그림 4.3 SPF (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>) 필터의 설계 및 제작 특성 비교

하지만 그림 3.8에서 RunSheet & simulator 기능을 사용하여 나타난 필터의 투과율 그래프 파형들과 차이가 있음을 확인 할 수 있다. RunSheet & simulator 기능을 사용하였을 때는 설계된 그래프 파형보다 모두 장파장 영역대로 이동되어 나타났으나 제작된 필터의 투과율 그래프는 설계 파형보다 단파장 영역대에 나타났다. 이는 Essential Macleod Program에선 ±오차에 상관없이 오차의

절대값 영역으로 계산되어 보여지는 overshoot 기능을 기본적인 사양으로 사용되었기 때문에 이와 같은 결과가 나온 것이다. 나온 결과는 대칭으로 해석해야 할 것이다. 그리고 증착 시 코팅물질의 증착 속도가 불균일하게 되어 증착 되거나 증착 물질이 설계치 와 다른 두께로 증착 되고, 온도조건과 물질특성상  $ZrO_2$ 보다 민감하기 때문에 제작된 필터의 그래프 파형이 설계된 그래프 파형보다 뒤쪽으로 물러나 그림 4.3과 같은 결과가 나올 수 있다.

#### 4-2절 제작된 필터의 고출력 특성

처음에는  $Ta_2O_5/SiO_2$ 를 이용하여 설계하였고, 필터의 LIDT 측정을 위해 펌프보호기가 실제로 장착될 광섬유 레이저의 출력을 높여가면서 실험을 하였지만 두 필터 모두 최대 출력에서도 정상적으로 동작되어 펌프보호기로 사용이 가능함을 확인하였다. 고출력 광섬유 레이저의 최대 출력에서의 필터의 동작특성을 측정한 결과 두 필터 모두 최대 평균 출력 25kw (beam dia. 0.8mm), 최대 침투 강도  $1GW/cm^2$ 까지 정상적으로 동작함을 확인하였다. 실험에 사용된 레이저의 출력특성은, 빔 사이즈 0.8 mm, 펄스 반복율은 20kHz, 펄스 폭은 15ns를 가지며, 평균 출력값은 7.5W이다. 레이저의 최대 출력에서의 출력 특성은 다음과 같이 계산되고, 결과 값을 표 4.1에 나타내었다.

Beam Dia	0.8 mm
Pulse Width	15ns
Pulse Repetition Rate	20kHz
Average Power ( $P_{avg}$ )	7.5W
Peak Power ( $P_{peak}$ )	25kW
Area ( $A = \pi r^2$ )	$5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$
Average Intensity ( $I_{avg}$ )	$0.3 \text{ MW/cm}^2$
Peak Intensity ( $I_{peak}$ )	$1 \text{ GW/cm}^2$
Fluence	$0.75 \text{ J/cm}^2$

표 4.1 고출력 특성 측정 실험에서 사용된 레이저의 동작 특성

$P_{peak} = P_{avg} \times 50\mu\text{s}/15\text{ns} = 25\text{kW}$  그리고 빔의 면적은  $A = \pi r^2 = 3.14 \times (0.4\text{mm})^2 = 3.14 \times (0.04\text{cm})^2 = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  가 되고 평균 침투 강도(intensity)는  $I_{avg} = 7.5\text{W}/(5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2) = 3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2 = 0.3 \text{ MW/cm}^2$ 의 값을 가지게 된다. 최대 침투 강도  $I_{peak} = 25\text{kW}/(5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2) = 1 \text{ GW/cm}^2$ 가 된다. 단위 면적당 energy(fluence)는 Pulse 한 개당 energy를 면적으로 나눈 것으로 우선, Pulse 한 개당 energy는  $7.5\text{W}/20\text{kHz} = 0.000375\text{J}$ 이 된다. 나온 값을 면적으로 나눠주게 되면  $0.000375\text{J}/5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 = 0.075\text{J/cm}^2$ 가 된다. 이는 표 3.1에 나오는 참고문헌의 LIDT와 비교했을 때 100배 이상 작은 값이므로, 두 코팅물질을 이용한 필터 모두에 대해 100배 이상 강한 레이저에 대해서도 사용 가능하다고 판단된다.

그림 4.4는 고출력 광섬유 레이저에서의 특성 측정 실험 장치도 사진이다.

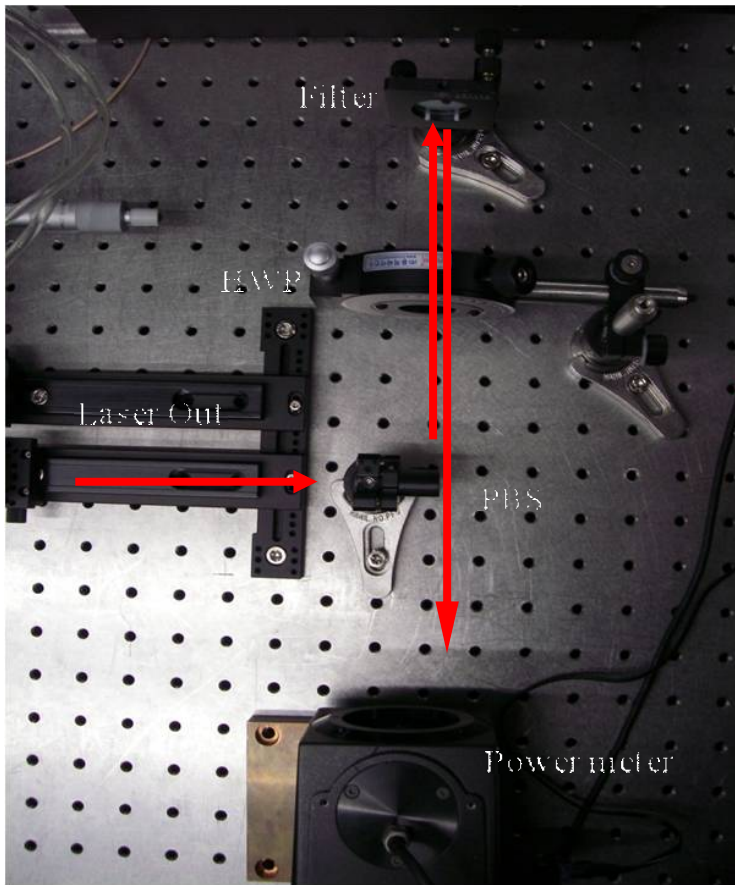


그림 4.4 고풍력 광섬유 레이저에서의 특성 측정 실험 장치도 사진

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 박막설계 프로그램인 Essential Macleod Program을 이용하여 Air/0.5L/H/(L/H)<sup>15</sup>/SiO<sub>2</sub>의 구조로 32개 층(SPF)과 2개 층(AR)을 쌓아 2색 필터를 설계하였고, 이 설계된 것을 바탕으로 제작된 필터의 특성을 파악하였다. 그 결과 905 nm ~ 925 nm 에서의 투과율은 이론적으로 설계했을 때와 실제로 증착 제작하여 측정하였을 때의 값이 다르게 나온 것을 확인할 수 있었다. 이는 공정상 증착 시킬 때, 물질간 증착속도, 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<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>와 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 각각의 설계를 통해 필터를 제작하여 특성을 측정한 결과 실제 예상된 오차율과 설계치, 목표치가 안정적인 필터는 그림 4.2를 통해 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>를 이용한 필터임을 확인할 수 있다.

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

제작된 두 가지 필터가 목표 설계치 와 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 레이저 다이오드를 보호하기에 적합한 성능을 보였으며, 따라서 펌프보호기용 필터로서 응용 가능하다고 판단된다.



## 참 고 문 헌

- [1] 황보창권, “광학박막의 최근 설계, 제작 기술 및 응용”, 한국광학회, 광학과 기술, 2, 57(1998).
- [2] C. C. Lee, Optical thin film and deposition technology, Japanese edition (Agne Technical Center, 2002).
- [3] R. R. Willey, Practical Design and Production of Optical Thin Films (Marcel Dekker, 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.” Pro.SPIE,4947, 50 (2003).
- [5] Sa-Young Shim, Sang Sun Lee and Dong Wook Shin, J.Korean Phys. Soc.46, 187(2005).
- [6] C. C .Lee, J. C. Hsu, D. t. Wei, J.H.Lin, Thin Solid Films 308, 74 (1997).
- [7] Honglae SOHN, Bong-Ju LEE, Young-Tae CHO, “The Effect of the RF-Sputtering Condition on the ZrO<sub>2</sub> Thin Film’ s Characteristics.” Journal of the Korean Physical Society, 51, 1038(2007).
- [8] S. G. Yoon, S. M. Kang, D. H. Yoon, “Residual Stress and Optical Properties in a Post-Annealed Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> Multilayer Prepared by Using Dual-Ion Beam Sputtering.” Journal of the Korean Physical Society, 49, 237(2006).
- [9] Cheng Xu, Jianke Yao, Jianyong Ma, Yunxia Jin, and Jianda Shao, “Laser induced damage threshold in n-on 1 regime of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> film at 532, 800, and 1064 nm” CHINESE OPTICS LETTERS, 5, 12(2007).

- [10] H. A. Macleod, Thin-Film Optical Filters, 2nd ed. (Macmillan, New York, 1986).
- [11] Z. Knittle, Optics of Thin Films (Wiley, London, 1976).
- [12] A. Thelen, Design of Optical Interference Coatings (McGraw-Hill, New York, 1989).
- [13] 황보창권, “박막광학(Thin Film Optics)” 테크미디어 출판사(2005).
- [14] 강만일, 류지욱, 김기원, 김찬희, 백영기, 이동현, 이성룡, “SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 광대역 반사방지막의 제작 및 광학적 특성 분석” 한국진공학회지 17, 138(2008).
- [15] M. I. Kang, K. W. Kim, C. H. Kim, Y. K. Beck, D. H. Lee, S. R. Lee, J. W. Ryu, “Development and Evaluation of Properties of SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> Multi-layer Films.” The Optical Society of Korea Annual Meeting (2008).
- [16] F. L. Pedrotti, L. S. Pedrotti, Introduction to optics (Prentice-Hill, 1982).
- [17] S. H. Kim, C. K. Hwangbo, “Derivation of the center Wavelength of Narrow Bandpass Filters Prepared by Plasma Ion-Assisted Deposition,” J. Kor. Phy. Soc. 45, 93(2004).
- [18] S. Papernov, A. Schmid, R. Krishnan, and L. Tsybeskov, “Using high reflector multilayer.” in 27th Annual Boulder Damage Symposium: Laser Induced Damage in Optical Materials: 1995, A. Guenther, M. Kozlowski, B. Newnam, and M. Soileau, eds., Proc. SPIE 2714, 384 (1996).
- [19] Geometric optical design and analysis on electromagnetic field

distribution in focal region of near field optics with solid immersion lens / Wan-Chin Kim, 연세대학교 석사학위 논문(2009).

- [20] Warren J. Smith 저, 임천석 [외]역, “기하 광학과 렌즈 설계를 중심으로” 북스힐(2007).
- [21] 오승호, 성하민, 전영민, 최우영, 16<sup>th</sup> COOC 2009 광전자 및 광통신 학술대회, 21(FP-24) (2009).
- [22] 오승호, 전영민, 최우영 “고출력 광섬유 레이저의 펌프 LD 보호기용 필터 설계 및 제작 특성” 한국물리학회지 “새물리” 제 59권 제 1 호(2009년 7월 31일 발행) 게재 예정.
- [23] Harold E. Bennett, Lloyd L. Chase, Arthur H. Guenther, “High damage threshold mirrors and polarizers in the  $ZrO_2/SiO_2$  and  $HfO_2/SiO_2$  dielectric systems.” SPIE 1624, 282(1991).
- [24] Jean-Yves Natoli, Laurent Gallais, Hassan Akhouayri, “Laser induced damage of materials in bulk, thin film, and liquid forms.” Applied Optics, 41, 16(2002).

## ABSTRACT

### Dichroic Filter of Pump Protectors for High Power Fiber Lasers Development

Oh, Seung Ho

M.S. in Electrical and Electronic Engineering

The Graduate School

Yonsei University

Recently demand for fiber laser move from existing super-high speed communication to high power processing, for this the high power fiber laser have advantages in high accuracy, high performance, higher processing and micro electronic industries of light source and laser cutter, welder etc., expecting wider use of applicable tools. But the intensity of laser output is high power due to this reflected light, it can break the use of pumping laser diode (LD) by inverse incidence light.

From this thesis for the protecting pump LD, Dichroic filter was planed and produced, measured the characteristics of inverse incidence from laser light to protect pump LD. Pump LD oscillation wavelength from the transmittance at the laser diode wavelength of 905nm ~ 925nm was measured to be more than 99.9 % and the transmittance (Short Pass Filter, SPF) at the fiber laser or Brillouin scattering wavelength of 1020nm ~ 1100nm, designed the filter to keep less than 0.1%. For the coating material type, it has to considers and

choose the transmittance etc, in field of usable wavelength.

The differences of rate of refraction between the materials are large, The differences of rate of refraction between the materials are large, at the same time adhesive strength has to be strong for this reasons if taking substrate  $\text{SiO}_2$ , advantageous to use Oxide material which has adhesive strength of thin film for this  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  are used. In Oxide materials  $\text{ZrO}_2$  has advantageous of higher high power use damage threshold than  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

Filters using  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  and  $\text{ZrO}_2$  were designed, fabricated, and their characteristics were measured and compared. Both filters using  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  and  $\text{ZrO}_2$  showed transmittance of 99.5 % ~ 99.9 % at 905 nm ~ 925 nm and 0.01 % ~ 0.09 % at 1020 nm ~ 1100 nm, which gave 2% ~ 3% of error which are more error than expected after the designed. This is because during the process, it needs to design building up with several layers of Filter, and also it cant build up with precise thickness, this can be the problem. If make up for the problem during the process, it can produce the desire products which can fit to the demands and supply the products smoothly, this industry will be the one of the meaningful industry sector.

-----  
Key words : Dichroic Filter, Fiber Laser, Essential Macleod Program, SPF,  
AR, Transmittance