

## Design of a Simply Structured High-efficiency Polarization-independent Multilayer Dielectric Grating for Spectral Beam Combining

Hyun-Ju Cho<sup>1†</sup>, Gwan-Ha Kim<sup>2</sup>, Dong Hwan Kim<sup>3</sup>, Yong-Soo Lee<sup>3</sup>, Sang-In Kim<sup>3</sup>,  
Joonyoung Cho<sup>3</sup>, Hyun Tae Kim<sup>3</sup>, and Young-seop Kwak<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Firearms & Optics, Daeduk University, 68, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34111, Korea

<sup>2</sup>Department of Semiconductor & Automation, Daeduk University, 68, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34111, Korea

<sup>3</sup>Laser & Sensor Systems, Hanwha Corporation, 305, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam 13488, Korea

<sup>4</sup>YS Optics, 114, Hansam-ro, Deoksan-eup, Jincheon 27850, Korea

(Received June 8, 2020; Revised June 25, 2020; Accepted June 28, 2020)

We design a polarization-independent dielectric multilayer thin-film diffraction grating for a spectral-beam-combining (SBC) system with a simple grating structure and low aspect ratio. To maintain the high quality of the SBC beam, we propose a multilayer mirror structure in which the wavefront distortion due to stress accumulation is minimized. Moreover, to prevent light absorption from contamination, an optimized design to minimize the grating thickness was performed. The optimally designed diffraction grating has 99.36% diffraction efficiency for -1st-order polarization-independent light, for incidence at the Littrow angle and 1055-nm wavelength. It is confirmed that the designed diffraction grating has sufficient process margin to secure a polarization-independent diffraction efficiency of 96% or greater.

Keywords: Diffraction grating, Polarization independent, Dielectric multilayer mirror, Reflection grating, Spectral beam combining  
OCIS codes: (050.1950) Diffraction gratings; (310.1620) Thin films interference coatings

## SBC 시스템 구성을 위한 단순한 구조를 가지는 고효율 무편광 유전체 다층박막 회절격자 설계

조현주<sup>1†</sup> · 김관하<sup>2</sup> · 김동환<sup>3</sup> · 이용수<sup>3</sup> · 김상인<sup>3</sup> · 조준용<sup>3</sup> · 김현태<sup>3</sup> · 곽영섭<sup>4</sup>

<sup>1</sup>대덕대학교 총포광학과

☎ 34111 대전광역시 유성구 가정북로 68

<sup>2</sup>대덕대학교 반도체자동화과

☎ 34111 대전광역시 유성구 가정북로 68

<sup>3</sup>(주)한화 종합연구소 레이저개발2팀

☎ 13488 경기도 성남시 분당구 판교로 305

<sup>4</sup>와이에스광학

☎ 27850 충청북도 진천군 덕산면 한삼로 114

(2020년 6월 8일 받음, 2020년 6월 25일 수정본 받음, 2020년 6월 28일 게재 확정)

격자의 구조가 간단하고 격자의 대조비가 낮은 SBC 시스템 구성을 위한 무편광 유전체 다층박막 회절격자를 설계하였다. SBC 방법으로 결합한 빔의 빔 품질을 높게 유지하기 위하여 회절격자의 파면 왜곡이 최소화되는 구조를 제안하였으며, 오염에 의한 흡수가 발생하지 않고 회절격자를 제작할 수 있는 구조로 회절격자를 최적화 설계하였다. 설계된 회절격자는 1055 nm 중심파장에서 Littrow 각도로 입사하는 경우 무편광 -1차 회절 효율이 99.36%이었으며, 96% 이상의 무편광 회절 효율을 나타내는 공정 여분이 확보되어 있음을 확인하였다.

Keywords: 회절격자, 무편광, 유전체 다층박막 반사경, 반사형 회절격자, 파장제어 빔 결합  
OCIS codes: (050.1950) Diffraction gratings; (310.1620) Thin films interference coatings

<sup>†</sup>E-mail: [hjcho@ddu.ac.kr](mailto:hjcho@ddu.ac.kr), ORCID: 0000-0003-4885-8025

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

## I. 서 론

최근 산업, 의료, 국방 등의 분야에서 고출력 레이저의 필요성이 대두되면서 저출력 레이저를 결합하여 고출력 레이저를 만드는 방법에 관한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있다. 저출력 레이저를 결합하는 방법으로는 결합하는 레이저의 위상이 일치하도록 만드는 방법과 결합하는 레이저의 위상을 고려하지 않는 방법으로 구별할 수 있다<sup>[1]</sup>. 파장제어 빔 결합(spectral beam combining, SBC) 방법은 회절격자를 사용하여 여러 개의 저출력 레이저를 한 방향으로 결합하는 방법으로, 구성이 간단하고 외부 충격에 의한 민감성이 없어서 산업 및 국방 분야 응용을 목적으로 개발이 진행되고 있다.

지금까지 보고된 대부분의 SBC 방법에서는 하나의 편광 성분만 고려한 편광 의존성이 있는 방식을 사용하고 있다<sup>[2-4]</sup>. SBC에 사용되는 광섬유 레이저 광원은 협대역 선풍 신호광을 증폭한다. 그러나 역방향 브릴루앙 산란 발생으로 인해 광섬유 레이저 모듈의 출력을 높이는 데 제한이 있다. 광섬유 레이저에서의 브릴루앙 산란의 문턱 세기는 무편광인 경우는 편광된 레이저에 비하여 2배 높다고 알려져 있다<sup>[5,6]</sup>. 이러한 무편광 광원을 이용하여 SBC를 구성하기 위해서는 편광에 무관하게 높은 회절효율을 가지는 반사형 회절격자가 필요하다. SBC 방법으로 고출력 레이저를 구성하는 경우에는 대부분 반사형 회절격자를 사용하며, 높은 레이저 출력으로 회절격자가 손상되는 것을 방지하기 위하여 흡수가 없는 유전체만으로 이루어진 유전체 다층박막 회절격자가 필요하다.

Li 등은 HfO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub> 두 층으로 구성된 사다리꼴 모양의 회절격자를 유전체 다층박막 반사경 위에 구성한 무편광 회절격자를 발표하였다<sup>[7]</sup>. Chen 등은 HfO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub> 중에서 2개의 조합으로 구성된 사다리꼴 모양의 회절격자를 구성하고, 이들의 제작 공차를 분석하였다<sup>[8]</sup>. Chen 등은 HfO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub> 두 층으로 구성된 직사각형 모양의 회절격자를 설계하여 높은 회절효율을 가지면서 반사 대역폭이 99 nm에 이르는 회절격자 구조를 발표하였다<sup>[9]</sup>. Cao 등은 SiO<sub>2</sub> 단층으로 총알 모양의 격자구조를 가지는 무편광 회절격자를 발표하였으며, 여기서 회절격자의 깊이는 1300 nm 이상으로 3이 넘는 높은 대조비(aspect ratio)를 갖는 구조로 이의 제작을 위하여 건식 식각 공정에서 금속의 Cr 박막 마스크를 사용하는 복잡한 과정이 필요하였다<sup>[10]</sup>. 다양한 구조의 반사형 무편광 회절격자에 관한 연구가 진행되었지만, 회절격자의 대조비가 낮아서 제작이 용이하며, 단층으로 구성된 회절격자에 관한 연구는 저자들이 아는 바로는 아직 보고되지 않았다. 본 논문에서는 높은 회절효율을 가지는 직사각형 모양의 단층 무편광 회절격자에 대하여 논의하고자 한다.

지금까지 보고된 대부분의 반사형 회절격자는 원추각(conical angle)이 0°인 경우로 한정하고 있으나, 실제 SBC를 구성하는 경우 입사된 광원과 Littrow 방향으로 회절되는 결합된 빛의 경로가 겹침으로 인하여 10° 미만의 원추각으로 기울여 시스템을 구성한다. 본 연구에서는 무편광 회절격자

의 원추각이 20° 이하로 기울어진 경우에 대해서도 분석을 수행하였다. 유전체 다층박막 회절격자는 박막증착, 리소그래피, 식각, 공정 잔유물 제거 등의 복잡한 과정을 거쳐서 제작된다. 본 연구에서는 여러 공정에서 발생할 수 있는 공정 오차를 고려하여, 공정이 가능한 수준의 설계가 되었는지도 함께 분석하였다.

## II. 무편광 회절격자 설계

### 2.1. 반사경 설계

SBC 시스템에서 요구되는 회절격자는 높은 레이저 출력에서 견딜 수 있으면서, -1차 방향으로의 회절효율이 매우 높은 회절격자이다. 또한, 구성된 SBC 시스템이 우수한 빔 품질(beam quality, M<sup>2</sup>)을 유지하기 위해서는 회절격자에서 발생하는 파면 왜곡(wavefront distortion) 오차가 최소화되어야 한다. 따라서 SBC 구성에 사용될 회절격자 제작용 반사경은 흡수가 매우 적고 결함이 없는 물질로 박막을 구성하여야 하며, 제작된 다층박막의 응력이 작아야 한다. Yb 첨가된(Yb doped) 광섬유 레이저 발진 파장 대역인 1030~1080 nm 범위에서 고출력 레이저용 다층박막 제작물질로는 레이저 상해 문턱(laser damage threshold) 값이 높은 것으로 알려진 SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 고려할 수 있다<sup>[11-13]</sup>. 그러나 SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 물질은 모두 압축응력을 가지는 물질로 이들을 사용하여 기존의 λ/4 광학적 두께를 가지는 층을 교대로 증착하여 반사경을 구성하는 경우 압축응력의 누적으로 응력에 의한 파면 왜곡이 크게 발생할 수 있다<sup>[14,15]</sup>. 본 연구에서는 다층박막의 응력 누적에 의한 파면 왜곡을 줄이기 위하여 상대적으로 압축응력이 더 큰 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 두께를 줄이고, 응력이 적은 SiO<sub>2</sub>를 두께를 늘이면서 높은 반사율을 얻을 수 있는 방법으로 반사경을 설계하였다. 회절격자 하단에서 반사경 역할을 하는 유전체 다층박막을

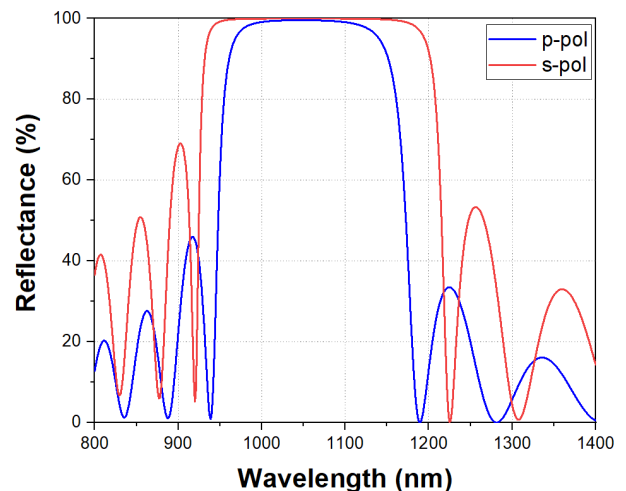


Fig. 1. Reflectance spectrum of a designed 24-layer dielectric mirror.

$$air|(H2L)^{12}|_{substrate} \quad (1)$$

의 구조로 기준파장 765 nm에서 입사각 40.6°로 설계하였으며, 여기서  $H$ 는  $Ta_2O_5$ 의  $\lambda/4$  광학적 두께를,  $2L$ 은  $SiO_2$ 의  $\lambda/2$  광학적 두께를 각각 나타낸다.

그림 1은 식 (1)의 구조로 설계된 유전체 다층박막의 반사율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 설계된 다층박막은 Yb 첨가된 광섬유 광원의 발진파장 영역인 1030~1080 nm 대역에서 수평 편광된(p-pol) 빛의 평균 반사율은 99.54%이고, 수직 편광된(s-pol) 빛의 평균 반사율은 99.97%로 두 편광 모두 높은 반사율을 나타낸다.

### 2.2. 회절격자 주기 결정

입사면에 입사광과 회절광이 위치한 경우, 공기 중에 있는 반사형 회절격자의 회절격자 방정식은

$$\sin\theta_m - \sin\theta_i = \frac{m\lambda}{p} \quad (2)$$

와 같이 주어지며, 여기서  $\theta_m$ 은  $m$ 차 회절된 빛의 회절각이고,  $\theta_i$ 는 회절격자에 입사하는 빛의 입사각이며,  $p$ 는 회절격자의 주기이다. 입사광이 입사면으로부터 원추각  $\phi$ 만큼 기울어진 경우 반사형 회절격자 방정식은

$$\sin\theta_m \cos\phi - \sin\theta_i \cos\phi = \frac{m\lambda}{p} \quad (3)$$

가 된다<sup>16,17</sup>. 회절광이 입사광의 방향으로 되돌아오는 Littrow 조건에서 높은 회절효율을 얻을 수 있으며, 이 경우  $\theta_m = -\theta_i$ 가 되고, -1차에서 높은 회절효율을 얻는 경우 식 (2)로부터

$$\theta_{Littrow} = -\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2p}\right) \quad (4)$$

와 같은 Littrow 입사각 조건을 결정할 수 있다. 회절격자의 각 분산(angular dispersion)은 식 (2)를 미분하여 역수를 취하면

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta m} = \frac{\lambda}{p \cos\theta_m} \quad (5)$$

가 된다<sup>18</sup>. 한편 가우시안 빔을 회절격자를 사용하여 결합한 경우 빔 품질을 나타내는  $M^2$ 는

$$M^2 = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi\omega_0(\Delta\lambda)}{2\lambda p \cos\theta_m}\right)^2} \quad (6)$$

으로 주어지며, 여기서  $\omega_0$ 는 빔살 허리(beam waist)이고,  $\Delta\lambda$ 는 레이저 빔의 반치폭(bandwidth)이다<sup>19</sup>. 따라서  $M^2 \approx 1$ 에

근접하는 좋은 품질의 레이저 광을 얻기 위해서는 격자의 주기가 커야 한다. 그러나 격자의 주기  $p$ 가 증가하면 식 (5)의 각 분산이 줄어들고, 이로 인하여 여러 개의 광섬유 광원을 결합하고자 하는 경우 SBC 시스템의 전체적인 크기가 증가하는 문제가 발생한다. 결과적으로 SBC 시스템에서 사용할 회절격자는 결합된 광원의 빔 품질과 시스템의 크기를 고려하여 적절한 수준에서 결정하여야 하며, 본 연구에서는 밀리미터당 1234개의 격자를 가지는  $p = 810$  nm를 사용하였고, 이 경우 식 (4)에 의하여 입사각은 40.6°가 된다.

### 2.3. 회절격자 구조 설계

유전체 다층박막 회절격자는 그림 2와 같은 구조를 갖는다. 기판 위에 2.1절에서 설계한 유전체 다층박막 반사경이 존재하고, 그 상단에 결합층(match layer)과 회절격자가 존재하며, 회절격자의 주기는  $p$ 이고 0에서 1 사이의 값을 가지는 반복률(duty cycle)  $f$ 의 비율로 격자를 구성하는 물질이 존재한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 회절격자의 회절효율은 회절격자의 물질과 결합층의 물질, 격자 주기  $p$ 가 결정된 상태에서 회절격자의 두께( $t_2$ ), 격자 반복률( $f$ ), 결합층 두께( $t_1$ ) 그리고 그 하단에 있는 유전체 다층박막의 두께에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 2.1절에서 설계된 24층의 유전체 다층박막 반사경의 두께는 고정된 상태에서, 반사경 최상단에 추가로 넣은 고굴절률 물질의 두께와 앞선 3개의 변수  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $f$ 를 최적화하는 방법으로 격자의 구조를 결정하였다.

회절격자의 회절효율을 계산하는 방법으로는 FEM (finite element method) RCWA (rigorous coupled wave analysis), FDTD (finite difference time domain) 등 다양한 방법이 있다. 본 연구에서는 이들 방법 중 계산 속도가 빠르고 최적화 프로그램 작성이 용이한 RCWA 방법을 사용하여 회절격자의 효율을 계산하였다. 실제 회절효율의 계산은 GD-Calc의 RCWA 알고리즘을 사용하였으며<sup>20</sup>, 이를 MATLAB에서 최

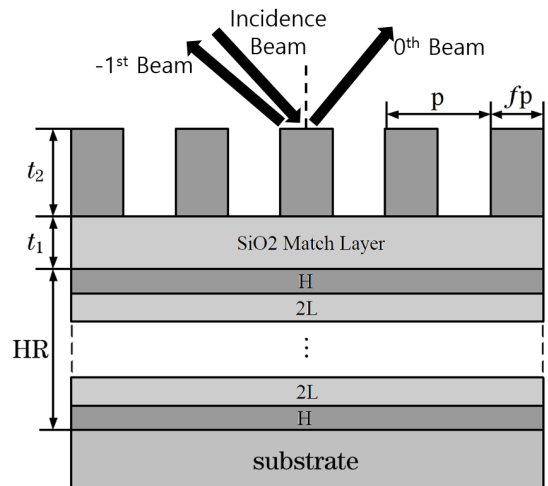


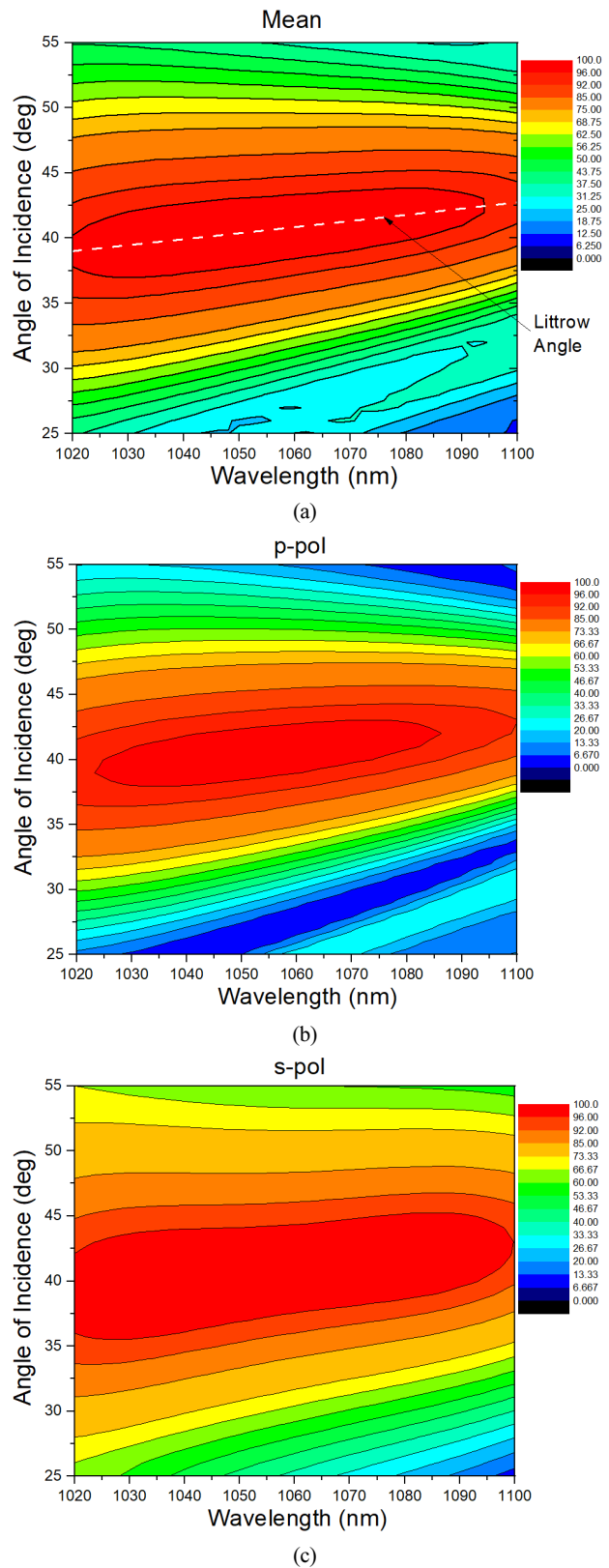
Fig. 2. Schematic diagram of the polarization-independent multi-layer dielectric grating.

적화 프로그램과 연동하여 계산 프로그램을 작성하였다. 최적화에는 유전 알고리즘(genetic algorithm)과 모의 담금질(simulated annealing) 알고리즘을 병행하여 회절격자의 파라미터를 최적화하였다. 계산에 사용한 기준파장은 Yb 첨가된 광섬유 광원의 중심에 해당하는 1055 nm이었으며, 입사각은 Littrow 각도인 40.6°이었다.

표 1은 최적화 프로그램으로 계산된 -1차에서 높은 회절효율을 가지는 유전체 다층박막 회절격자 구조이다. 식각 공정을 사용하여 형성해야 하는 회절격자의 두께가 323 nm로 격자의 대조비가 1.17 수준으로 낮아서, 오염 발생의 소지가 많은 금속 마스크를 사용하지 않고, 유기물 마스크를 사용하여 식각이 가능한 두께이다. 기준파장 1055 nm, 입사각 40.6°에서 p-편광된 빛의 -1차 회절효율은 98.75%이고, s-편광된 빛의 -1차 회절효율은 99.96%로 무편광된 빛의 회절효율이 99.36%이었다. 그림 3은 최적화 조건에서 파장과 입사각의 변화에 따른 회절효율을 나타낸다. 회절효율은 점선으로 표시된 Littrow 각을 기준으로 대칭의 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 3(a)는 편광 의존성이 없는 무편광 상태의 회절효율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 설계된 회절격자는 파장 1020~1090 nm 범위에서 Littrow 각 ±3° 이내로 입사하는 빛에 대하여 96% 이상의 무편광 회절효율을 가진다. 그림 3(b)와 3(c)는 각각 수평 편광된 성분과 수직 편광된 성분의 파장과 입사각 변화에 따른 회절효율을 나타낸다. 전체적으로 수평 편광된 빛의 회절효율이 수직 편광된 빛의 회절효율에 비하여 약간 낮은 회절효율을 나타내고 있으며, 이는 유전체 다층박막 반사경의 반사율 특성에서 기인하는 것으로 판단된다. 단일 회절격자를 사용하여 격자밀도가 1234 l/mm인 회절격자에 1030~1080 nm 사이의 광원을 입사시키는 경우 광원의 입사 범위가 Littrow 각도 ±2.5° 미만이다. 최적화를 통하여 설계된 회절격자의 무편광 회절효율은 1030~1080 nm 대역에서 Littrow 각도 ±2.5° 범위 이내로 입사하는 경우 p-편광된 빛의 평균 -1차 회절효율은 96.05%, s-편광된 빛의 -1차 평균 회절효율은 97.47%로, 이 범위에서 무편광된 빛의 평균 회절효율은 97.43%로, 설계된 회절격자

**Table 1.** Designed values of diffraction parameters determined based on the genetic and simulated annealing optimization. The polarization-independent diffraction efficiency at wavelength of 1055 nm and Littrow angle of incidence is 99.36%

ID	Material	Refractive index	Thickness (nm)
Grating ( $t_1$ )	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.10	323
Duty cycle ( $f$ )		0.66	
Match layer ( $t_2$ )	SiO <sub>2</sub>	1.46	198
Top mirror layer	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.10	90
Low index layer (L)	SiO <sub>2</sub>	1.46	263
High index layer (H)	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.10	90
Substrate	Fused silica		



**Fig. 3.** -1st diffraction efficiency of the designed grating as a function of wavelength and angle of incidence. (a) Polarization-independent diffraction efficiency. The dotted line represents the Littrow angle. (b) p-polarization diffraction efficiency. (c) s-polarization diffraction efficiency.



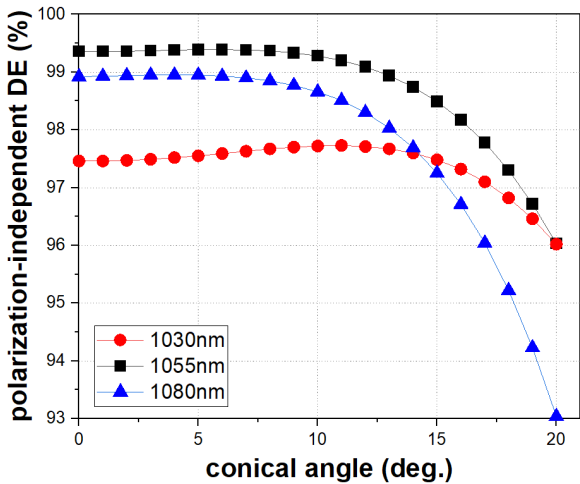


Fig. 4. Polarization-independent diffraction efficiencies at three different wavelengths as a function of conical angle.

는 고효율 빔결합 시스템을 구성하기에 적합한 회절격자로 판단된다.

회절격자가 Littrow 각도에서 높은 회절효율을 가짐에 따라 -1차 방향으로 회절된 빛은 입사광 방향으로 나온다. 따라서 SBC 시스템을 구성하는 경우 입사면에 광원과 회절격자를 놓으면 광의 진행 방향이 겹치는 기하학적 간섭이 발생한다. 이를 회피하기 위하여 SBC 시스템은 4-5° 정도로 원추각이 틀어진 평면에 광원과 회절격자를 구성하여, 출력광과 입사되는 광섬유 광원의 간섭이 없도록 한다. 그림 4는 설계된 회절격자의 파장별 원추각 변화에 따른 무편광 회절효율을 나타낸다. 설계된 회절격자는 1055 nm 중심파장과 이로부터 각각 25 nm 떨어진 Yb 첨가 광섬유 광원의 파장대역에서 원추각 10° 이내의 변화에서는 무편광 회절효율의 변화가 거의 없어서 SBC 시스템을 구성하기 위하여 적절한 원추각 회절 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

### III. 회절격자 제작을 위한 공차 분석

SBC 구성에 사용되는 회절격자는 파면 왜곡이 작을수록 결합된 고풍력 빔의 빔 품질을 좋게 유지할 수 있다. 이를 위하여 회절격자 제작용 기판은 두께가 20 mm에 이르는 두꺼운 용융 석영(fused silica) 기판을 사용한다. 유전체 다층박막 회절격자는 그림 2에서 알 수 있듯이, 연마된 기판 위에 유전체 다층박막 반사경을 증착하고, 그 위에 결합층과 회절격자를 형성하기 위한 박막을 순차적으로 형성한다. 회절격자 형성을 위하여 제거될 부분을 제외한 나머지 부분을 가리는 마스크 층을 형성하고, 건식 또는 습식 식각을 활용하여 불필요한 부분을 제거한다. 이후 마스크로 사용한 물질을 제거하고, 공정 잔유물을 세척하면 회절격자 제작이 완료된다. 두꺼운 기판을 사용하기 때문에 얇은 웨이퍼에 맞추어 잘 개발되어있는 포토 리소그래피(photo lithography) 공정 적용이 까다로운 문제가 발생하며, 이를 해결하는 방법으로 광의 간

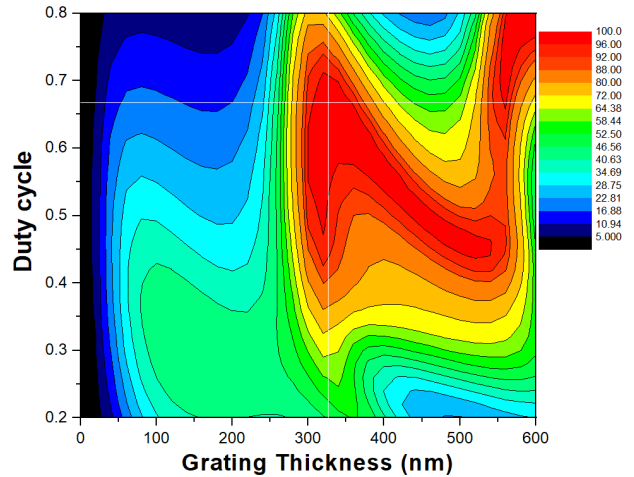


Fig. 5. 3D contour map of polarization-independent diffraction efficiencies as a function of grating thickness and duty cycle.

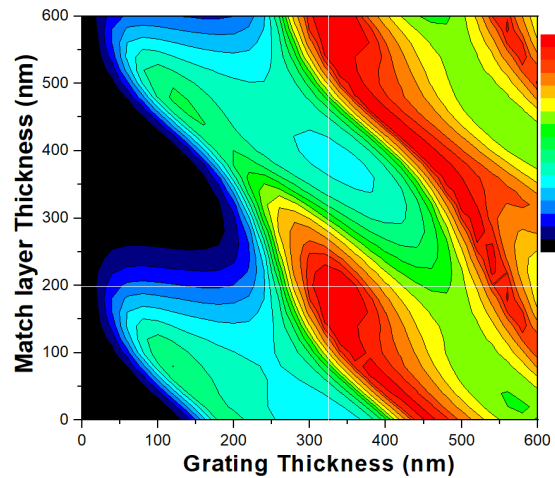


Fig. 6. 3D contour map of polarization-independent diffraction efficiencies as a function of grating thickness and match layer thickness.

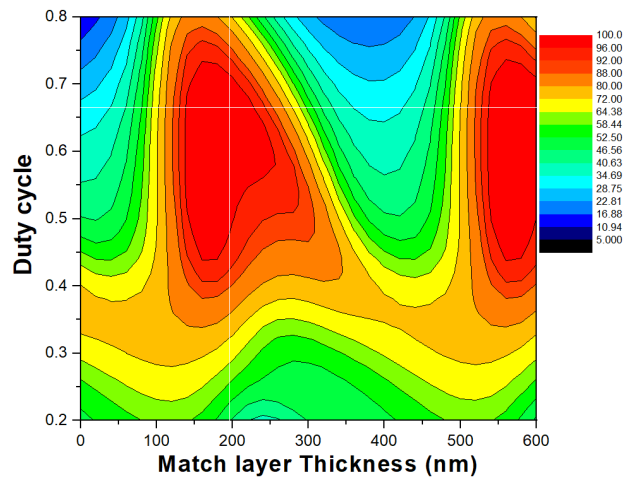


Fig. 7. 3D contour map of polarization-independent diffraction efficiencies as a function of duty cycle and match layer thickness.

섭을 활용하는 홀로그래피 리소그래피(hologram lithography), 유기물 거푸집(mold)을 활용하는 나노 임프린트 리소그래피(nano-imprint lithography) 등의 공정을 사용한다. 박막을 제작한 후 리소그래피, 식각 등 후속 공정이 진행되고, 적용할 수 있는 공정도 기판의 두께 문제로 제한되면서, 설계된 회절격자를 원활히 제작하기 위해서는 제작 공정에서 발생할 수 있는 오차를 수용할 수 있는 공정 여분의 확보가 필요하다.

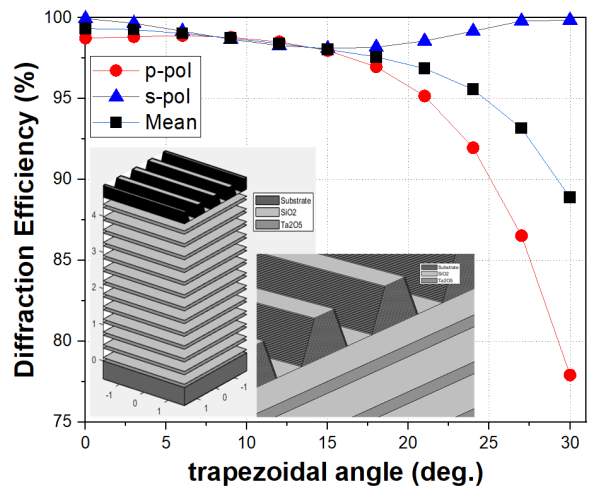
그림 5는 최적화 설계된 무편광 회절격자의 격자 두께와 반복률 변화에 따른 -1차 무편광 회절격자의 회절효율 변화를 나타낸다. 그림에서 흰색의 실선이 교차하는 지점이 최적화 설계 조건을 나타내고, 회절격자의 -1차 무편광 회절효율 96% 이상을 가지는 조건은 격자 두께 305~357 nm, 반복률 0.53~0.71의 범위에 있음을 알 수 있다. 반복률 값을 격자 주기 810 nm를 고려하여 회절격자가 형성되는 쪽으로 환산하면 429~573 nm 범위가 된다. 그림 6은 설계된 무편광 회절격자의 격자 두께와 결합층 두께의 변화에 따른 -1차 무편광 회절효율을 나타낸다. 설계된 회절격자가 -1차에서 96% 이상의 회절효율을 가지려면, 격자의 두께는 305~361 nm 범위를 가져야 하고, 결합층 두께는 141~231 nm 사이에 존재하여야 함을 알 수 있다. 그림 7은 결합층의 두께와 반복률의 변화에 따른 최적화 설계된 회절격자의 -1차 무편광 회절효율을 나타낸다. 결합층의 두께 139~228 nm 범위와 반복률 0.47~0.72 범위에 회절격자가 형성되면, 제작된 회절격자의 -1차 회절효율은 96% 이상이 된다.

그림 5에서 그림 7의 분석 결과를 바탕으로 회절격자의 -1차 무편광 회절효율이 96% 이상이 되기 위한 최소 범위를 설정하였으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다. 회절격자의 두께는 목표값 기준 52 nm 범위 이내에서 제작이 이루어져야 하며, 격자의 두께가 목표값보다 두꺼운 두께를 갖는 경우가 상대적으로 높은 회절효율을 가질 수 있다. 무편광 회절효율 96% 이상을 확보하기 위한 결합층의 두께는 87 nm의 공정 여유를 가지고 있으며, 결합층의 두께가 낮은 쪽으로 더 넓은 공정 여유를 확보하고 있다. 반복률의 경우 동일한 회절효율을 확보하기 위해서는 0.18의 상대적으로 넓은 공정 여유를 가지고 있으며, 이를 격자의 폭으로 환산하면 144 nm 이고, 격자의 폭이 넓은 것보다는 좁게 형성되는 것이 높은 회절효율 확보에 유리한 것으로 나타났다. 한편, 고굴절률 물질과 회절격자로 사용된 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 굴절률은 2.02~2.26 범위에서, 그리고 저굴절률 물질과 결합층으로 사용된 SiO<sub>2</sub>의 굴절률은 1.26~1.53의 범위에서 제작되는 경우 무편광 회절효율 96% 이상이 확보되었다.

회절격자를 형성하는 방법으로 대부분 건식 식각(dry etching) 공정을 사용한다. 건식 식각은 리소그래피를 통하여 회절격자가 형성될 부분을 가린 후, 제거될 부분에 에너지를 가진 반응성 이온을 인가하여 불필요한 부분을 제거하는 방법이다. 건식 식각 공정에서 식각 조건에 따라 약간의 차이가 있지만, 설계에서 반영한 완전한 수직 형태의 격자가 아닌 사다리꼴 모양의 격자가 제작될 가능성도 존재한다. 그림 8은 회절격자가 사다리꼴 모양을 형성하는 경우, 사다리꼴

**Table 2.** Process margin of the grating thickness, match layer thickness, duty cycle, trapezoidal angle, and refractive indices of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and SiO<sub>2</sub> for more than 96% polarization-independent diffraction efficiency

Process parameter	Parameter range		
	Target	Minimum	Maximum
Grating ( $t_1$ )	323 nm	305 nm	357 nm
Match layer ( $t_2$ )	198 nm	141 nm	231 nm
Duty cycle ( $f$ )	535 nm	429 nm	573 nm
Trapezoidal angle	0°	0°	22°
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> refractive index	2.10	2.02	2.26
SiO <sub>2</sub> refractive index	1.46	1.26	1.53



**Fig. 8.** Diffraction efficiencies for each polarization component as a function of trapezoid internal angle. The inset shows the shape of the grating and the detailed shape of the trapezoidal grating.

내면의 각도에 따른 회절효율의 변화를 나타낸다. 최적화 설계를 통하여 표 1에 제안된 회절격자의 경우 사다리꼴을 형성하는 내면의 각도가 22° 이하인 경우 회절격자의 무편광 회절효율은 96% 이상이 됨을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

SBC 시스템 구성에 사용하기 위한 편광 의존성이 없는 한층으로 이루어진 단순한 구조의 유전체 다층박막 회절격자를 제안하였다. 설계된 회절격자는 유전체 다층박막 반사경의 응력 누적에 의한 파면 왜곡을 최소화하기 위하여 통상적인 반사경 설계를 벗어나 응력이 큰 고굴절률 물질의 두께를 최소화하는 방안으로 구성하였다. 최적화 기법을 사용하여 회절격자의 두께, 반복률, 결합층 두께를 결정하였으며 중심 파장에서 Littrow 각으로 빛이 입사하는 경우 무편광 회절효율은 99.36%이었다. 최적 설계된 회절격자는 323 nm 두께를 가지는 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 단층 구조로 오염 가능성이 있는 금속 마스크를 사용하지 않고, 유기물 마스크로 충분히 식각이 가능한

수준이었다. SBC 시스템 구성이 원추각이 0°가 아닌 구조로 이루어짐을 고려하여 최적화 설계된 회절격자의 원추각 특성을 분석하였으며, 원추각 10° 이내의 범위에서는 무편광 회절격자의 회절효율에 거의 변화가 없음을 확인하였다. 박막 증착, 리소그래피, 식각, 잔유물 제거 등의 복잡한 과정을 통하여 회절격자가 제작되는 점을 고려하여, 공정에 충분한 여유가 있는지를 분석하였으며, 그 결과 회절격자 두께 52 nm, 결합층 두께 87 nm, 격자폭 144 nm의 오차범위 안에서 96% 이상의 무편광 회절효율을 가짐을 확인하였다. 또한, 건식 식각에 의하여 직사각형이 아닌 사다리꼴 모양의 회절격자가 형성되는 경우 사다리꼴을 형성하는 내면의 각도가 22° 이하인 경우 96% 이상의 무편광 회절효율을 가짐을 확인하였으며, 이는 증착, 리소그래피, 식각 공정에서 충분히 제작 가능한 수준으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 (주)한화의 지원과 중소벤처기업부 창업성장기술타발사업 디딤돌 과제(과제번호: S2803645)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

### References

1. T. Y. Fan, "Laser beam combining for high-power, high-radiance sources," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11**, 567-577 (2005).
2. C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin, T. Schreiber, T. Peschel, F. Brückner, T. Clausnitzer, J. Limpert, R. Eberhardt, A. Tünnermann, M. Gowin, E. tan Have, K. Ludewigt, and M. Jung, "2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers," *Opt. Express* **17**, 1178-1183 (2009).
3. T. H. Loftus, A. M. Thomas, P. R. Hofman, M. Norsen, R. Royse, A. Liu, and E. C. Honea, "Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications," *IEEE J. Quantum Electron.* **13**, 487-497 (2007).
4. M. Jeon, Y. Jung, J. Park, H. Jeong, J. W. Kim, and H. Seo, "High-power quasi-continuous wave operation of incoherently combined Yb-doped fiber lasers," *Curr. Opt. Photon.* **1**, 525-528 (2017).
5. M. Strecker, M. Plötner, F. Stutzki, T. Walbaum, S. Ehrhardt, T. Benkenstein, U. Zeitner, T. Schreiber, R. Eberhardt, A. Tünnermann, U. Stuhr, M. Jung, and K. Ludewigt, "Highly efficient dual-grating 3-channel spectral beam combining of narrow-linewidth monolithic cw Yb-doped fiber amplifiers up to 5.5 kW," *Proc. SPIE* **10897**, 108970E (2019).
6. Y. Zheng, Y. Yang, J. Wang, M. Hu, G. Liu, X. Zhao, X. Chen, K. Liu, C. Zhao, B. He, and J. Zhao, "10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation," *Opt. Express*

- 24**, 12063-12071 (2016).
7. L. Li, Q. Liu, J. Chena, L. Wang, Y. Jin, Y. Yang, and J. Shao, "Polarization-independent broadband dielectric bilayer gratings for spectral beam combining system," *Opt. Commun.* **385**, 97-103 (2017).
8. J. Chen, Y. Zhang, Y. Wang, F. Kong, H. Huang, Y. Wang, Y. Jin, P. Chen, J. Xu, and J. Shao, "Polarization-independent broadband beam combining gratings with over 98% measured diffraction efficiency from 1023 to 1080 nm," *Opt. Lett.* **42**, 4016-4019 (2017).
9. J. Chen, Y. Jin, and J. Shao, "Design of broadband polarization-independent multilayer dielectric grating," *Proc. SPIE* **10339**, 1033911 (2017).
10. H. Cao, J. Wu, J. Yu, and J. Ma, "High-efficiency polarization-independent wideband multilayer dielectric reflective bullet-alike cross-section fused-silica beam combining grating," *Appl. Opt.* **57**, 900-904 (2018).
11. X. Cheng, Z. Shen, H. Jiao, J. Zhang, B. Ma, T. Ding, J. Lu, X. Wang, and Z. Wang, "Laser damage study of nodules in electron-beam-evaporated HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high reflectors," *Appl. Opt.* **50**, C357-C363 (2011).
12. L. Gallais, B. Mangote, M. Zerrad, M. Commandre, A. Melninkaitis, J. Mirauskas, M. Jeskevic, and V. Sirutkaitis, "Laser-induced damage of hafnia coatings as a function of pulse duration in the femtosecond to nanosecond range," *Appl. Opt.* **50**, C178-C187 (2011).
13. J.-Y. Natoil, L. Gallais, H. Akhuyayri, and C. Amra, "Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms," *Appl. Opt.* **41**, 3156-3166 (2002).
14. M. Sugiura, K. Tamura, and M. Kobiyama, "Quantitative calculation of substrate bending caused by multilayer coating stresses," *Appl. Opt.* **59**, A92-A98 (2020).
15. H.-J. Cho, *Practical Optical Thin Films* (Books-Hill, Seoul, Korea. 2015), pp. 278-280.
16. J. E. Harvey and C. L. Vernold, "Description of diffraction grating behavior in direct cosine space," *Appl. Opt.* **37**, 8158-8159 (1998).
17. J. E. Harvey and R. N. Pfisterer, "Understanding diffraction grating behavior: including conical diffraction and Rayleigh anomalies from transmission gratings," *Opt. Eng.* **58**, 087105 (2019).
18. N. Bonod and J. Neauport, "Diffraction gratings: from principles to applications in high intensity lasers," *Adv. Opt. Photonics* **8**, 156-199 (2016).
19. H.-J. Cho, K.-H. Lee, S.-I. Kim, J.-H. Lee, H.-T. Kim, W.-S. Kim, D. H. Kim, Y.-S. Lee, S. Kim, T. Y. Kim, and C. K. Hwangbo, "Analysis on design and fabrication of high-diffraction-efficiency multilayer dielectric gratings," *Curr. Opt. Photon.* **2**, 125-133 (2018).
20. K. Johnson, *Diffraction optics simulation and design from KJ Innovation* (KJ Innovation) www.kjinnovation.com (Accessed date: 2020. 05. 22).