

포토레지스트 Surface-Relief 위상형 홀로그래피 분광회절격자의 제작 및 성능평가

(Fabrication of the Photoresist Surface-Relief Phase Holographic Grating and Its Performance Test)

鄭 滿 鎬*, 李 仁 遠*, 李 相 培**, 朴 玟 用**

(Man Ho Jeong, In Won Lee, Sang Bae Lee and Mignon Park)

要 約

분광광도계 등과 같은 광학기기의 핵심 부품인 분광회절격자를 홀로그래피 방법에 의하여 포토레지스트를 감광재료로 사용하여 제작하였다. 이때 사용된 광원은 아르곤 레이저였으며 사용 파장은 488nm 였다. 격자상수가 1,200lines/mm인 투과형의 표면양각된 위상형 회절격자 및 그 위에 알루미늄을 두께 2,000Å으로 코팅한 반사형의 표면양각된 위상형 회절격자를 제작하였다. 회절효율, 산란된 빛의 량 및 파면의 수차를 측정하여 제작된 회절격자의 성능을 평가하였다. 브래그 각도로 입사하였을때 가장 높은 회절효율을 얻었으며 이론상으로 80% 정도였으나, 측정 결과 투과형은 50%, 반사형은 45% 정도였다.

Abstract

Holographic diffraction gratings which are the core element of the optical instruments such as a spectrophotometer have been fabricated using the photoresist as a recording material. A 488nm line from an argon laser is used in making the gratings. Transmission type surface-relief phase grating and reflection type which is fabricated by coating the aluminum on the transmission type with thickness 2000Å are fabricated, the spatical frequency of which are 1200 lines/mm. Diffraction efficiency, scattered light and wave-front aberration are measured to test the performance of the developed gratings. A marimum diffraction efficiency is given when light is incident at the Bragg angle. Theoretical efficiency is about 80%, but measured efficiency of the transmission type and reflection type is 50% and 45%, respectively.

I. 서 론

표면양각된 회절격자는 광도파로의 광결합소자,^[1] 홀로렌즈,^[2] 레이저 스캐너,^[3] 및 파장분할기 등 홀로그래피 광학소자로서의 응용이 많으므로 활발한 연구가 진행되고 있다.^[4]

포토레지스트를 감광재료로 사용하여 제작된 표면양각된 회절격자는 많은 노력에도 불구하고 회절효율이 30% 이하로써 낮은 효율을 나타내어 왔다.^[5] 그러나 최근에 Moharam과 Gaylord가 광결합 이론을 전개하여 유전체형의 표면양각된 회절격자를 해석하였으며, 포토레지스트를 사용한 표면양각된 회절격자의 회절효율이 이론적으로 80% 정도까지 가능한 것을 밝혔다.^[6] 최근에 이들의 이론을 바탕으로 하여 격자상수가 3,000 lines/mm인 투과형 회절격자를 Enger와 Case가 실험적으로 제작하였으며 최대 효율은 80% 정도였다.^[7] 국내에서도 포토레지스트를 사용하여 광도파로의 광결합

*正會員, 韓國標準研究所 光學研究室
(Optics Lab., KSRI)

**正會員, 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1987年 4月 18日

소자 용으로 쓰기 위한 회절격자¹¹⁾ 및 반도체 레이저의 결합소자로 쓰기 위한 회절격자가 제작된 바 있다.¹¹⁾ 그러나 이러한 회절격자의 회절효율 및 기타 성능평가는 전혀 없는 실정이다. 본 연구에서는 높은 효율 등 질 높은 성능을 필요로 하는 분광광도계, 분광분석기 등과 같은 광학기에 사용할 목적으로 회절격자를 제작한 후 필요한 성능을 평가하였다. 특히 투과형 회절격자 위에 알루미늄을 코팅하여 반사형 회절격자를 제작하였다. 성능평가 결과 광학기기용으로의 핵심 부품인 회절격자로 사용 가능함을 제시하였다.

II. 홀로그래피 분광회절격자의 기본 이론

포토레지스트를 감광재료로 사용하는 표면양각된 위상형 회절격자는 홀로그래피 방법에 의하여 노광된 후에 현상시 밝은 무늬 부분과 어두운 무늬 사이의 선택적 현상작용 때문에 얻어진다. 같은 진폭을 가지는 두개의 평면파가 어떤 시간에 간섭을 일으키는 모습이 그림 1에 나타나 있다. 실선은 최대 진폭을 가지며 웨이지 앞으로 나오는 견계를 나타낸다. 어떤 시간에 두 평면파가 교차하였을때 두개의 실선 또는 두개의 점선이 만나는 점이 최대 진폭을 갖게 된다. 이 점들은 흰 원으로 표시하였다. 또한 점선과 실선이 만나는 지점은 진폭이 최소이며 검은 원으로 표시하였다. 결국 두 평면파가 간섭을 일으켜 밝은 점이 모인 선은 밝은 무늬가 그리고 어두운 점이 모인 선은 어두운 무늬가 생기게 되며, 이 무늬들을 감광기록면에 노출시켜 회절격자를 만들게 된다.¹⁰⁾

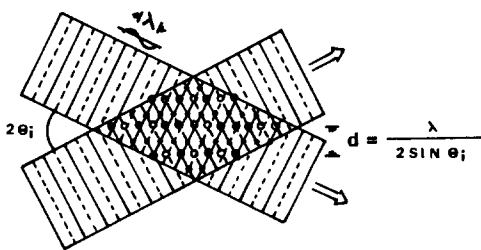


그림 1. 두 평면파의 간섭
Fig. 1. Interference of Two Plane Waves.

입사파의 파장을 λ , 입사각을 θ_i 라 하면 이때 얻어진 회절격자의 격자간격 $d = (\lambda / 2 \sin \theta_i)$ 로 주어진다. 회절격자에 각 θ_i 로 입사된 빛이 각 θ_a 로 회절되어 나갈 때 식 (1)과 같이 회절격자의 표현식을 쓸 수 있다.

$$m\lambda = d(\sin \theta_i + \sin \theta_a) \quad (1)$$

이때 만일 입사된 각과 같은 각으로 회절되어 나갈

다면 $\theta_i = \theta_a$ 가 되며, θ_a 를 브래그 각도라 한다. 식 (2)에 브래그 각도의 표현식을 나타내었다.¹¹⁾

$$\theta_a = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{2d} \right) \quad (2)$$

III. 분광회절격자의 제작

홀로그래피 방법으로 제작된 분광회절격자는 다이아몬드날을 사용하여 알루미늄이 코팅된 유리기판에 격자를 만드는 방법에 비하여 제작이 용이하며 격자의 간격이 일정하며 격자의 구부러짐이 없어 빛의 산란 등과 같은 잡음이 없다는 장점이 있다. 특히 포토레지스트를 사용하여 제작되는 표면양각된 위상형 회절격자는 복제판도 만들 수가 있다. 또한 포토레지스트를 이용한 홀로그래피 방법은 격자의 주기가 $0.1 \mu\text{m}$ 인 회절격자의 제작도 가능하다.¹²⁾ 그러나 홀로그래피 방법에 의해 제작된 회절격자는 다이아몬드날에 의해 기계적으로 제작되는 회절격자에 비해 브레이징 하기가 어렵다는 단점이 있다. 그림 2에 홀로그래피 방법에 의해 회절격자를 제작하는 장치도를 나타내었다. 노출 광원으로는 아르곤 레이저를 사용하였으며 파장은 488nm 이다.

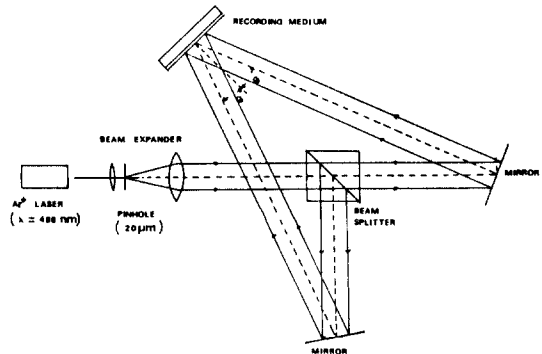


그림 2. 홀로그래피 회절격자 기록 장치도
Fig. 2. Diagram of the Holographic Grating Recording System.

높은 회절효율을 갖는 회절격자의 제작에 가장 중요하게 작용하는 파라미터는 격자깊이와 격자간격의 비이다. 실제로 포토레지스트를 사용한 경우 이들의 비가 1.5 정도일때 가장 높은 효율을 나타낸다는 사실이 알려져 있다.¹⁴⁾ 가시영역의 광측정용 분광회절격자는 격자상수가 $1,200 \text{ lines/mm}$ 인 것이 많이 쓰이므로 본 연구에서는 Shipley AZ-1370 포토레지스트를 $4,000 \text{ rpm}$ 으로 30초간 스핀 코팅하여 두께가 $1.2 \mu\text{m}$ 가 되게

하였다. 현상시에 유리기판의 경계면까지 엇칭을 잘하여 격자깊이가 $1.2\mu\text{m}$ 가 되어 격자간격과의 비가 1.5 정도 되게 하였다. 이러한 조건에 부합하는 회절격자를 제작하려면 광원의 출력 및 노출 시간, 그리고 현상액의 농도 및 현상 시간을 잘 조절하여야 한다. 본 연구에서는 아르곤 레이저의 출력을 488nm의 파장에서 1W로 하여 5분간 노출시킨 후 현상액 D-450 과 물을 1:1로 섞은 용액속에 10초간 현상하였다. 제작시에 노출 과정에서 유리 뒷면에서 반사가 일어나 깨끗한 회절격자를 제작하기 어려우므로 유리 뒷면에 반사 억제 오일을 발랐다.

그림 3은 제작된 반사형의 표면양각된 회절격자를 SEM으로 찍은 사진이며 배율은 10,000배로 하였다.

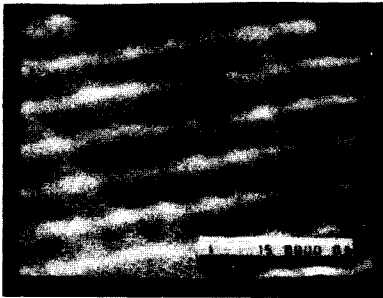


그림 3. 포토레지스트 반사형 표면양각된 회절격자의 SEM 사진(배율=10,000, 격자상수=1,200 lines/mm)

Fig. 3. SEM Photograph of the Photoresist Reflection-Type Surface-Relief Grating. ($\times 10,000$, Spatial Frequency = 1,200 lines/mm).

IV. 회절격자의 성능평가

1. 분광회절효율 측정

일반적으로 회절격자의 회절효율은 각 파장에 따라서 TE, TM 편광모드를 따로 측정하여 각각의 회절효율을 구한다.¹³⁾ 이러한 방법은 실제적으로 측정하기가 어려우며 보통 회절격자의 회절효율은 전체 입사광의 강도에 대한 회절된 광의 강도의 비로써 구한다. 본 연구에서는 제작된 투과형 회절격자의 회절효율을 각 파장별로 입사각을 변화시키면서 측정하였다. 측정에 사용된 광원은 편광도가 5%인 텅스텐 램프였으며 대역폭이 10nm인 각 파장별 간섭필터를 사용하여 파장을 선별하였다. 그림 4는 가시영역의 파장가운데 550nm, 600nm, 650nm 및 700nm 파장에 대하여 각각 입사각을 변화시킴에 따른 회절효율을 나타내고 있다. 그림

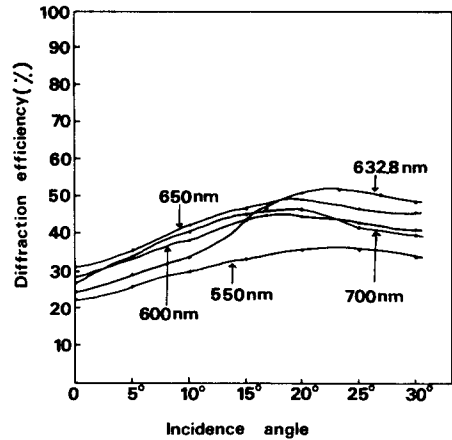


그림 4. 입사각의 변화에 따른 투과형 회절격자의 파장별 회절 효율

Fig. 4. Diffraction Efficiencies of the Transmission-Type Grating for Various Wavelengths at Different Incidence Angles.

4에서 알 수 있듯이 브래그 각도 근처에서 빛이 입사되었을 때 회절효율이 가장 높았다.

그림 5는 제작된 투과형 회절격자의 파장별 최대 회절효율을 가시영역인 400nm에서 700nm까지 나타낸 것으로 +1차로 회절된 성분이다. 측정 결과 400nm와 500nm에서는 30% 정도였고 600nm에서 700nm 사이에서는 효율이 50% 정도였으며 이 점은 가시영역의 광 측정용 분광회절격자로서 훌륭함을 보여 주고 있다.

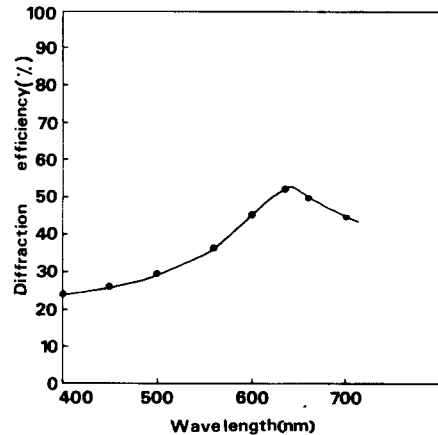


그림 5. 투과형 회절격자의 가시영역 파장에서의 최대 효율

Fig. 5. Maximum Diffraction Efficiencies of the Transmission-Type Grating for Visible Wavelengths.

그림 6 은 제작된 투과형 회절격자의 회절효율을 입사각의 변화에 따라 0 차, +1 차 및 -1 차 성분을 측정 한 값이다. 측정결과 입사각이 브래그 각도 보다 작은 부분에서는 -1 차 성분이 존재하나 브래그 각도 이상에서는 없음을 알 수 있다. 측정 광원은 파장이 632.8nm인 He-Ne 레이저였으며 편광은 TM (P-편광) 모드이고 편광도는 99%였다. 반사형 회절격자의 +1 차 최대효율은 측정결과 45% 정도였다.

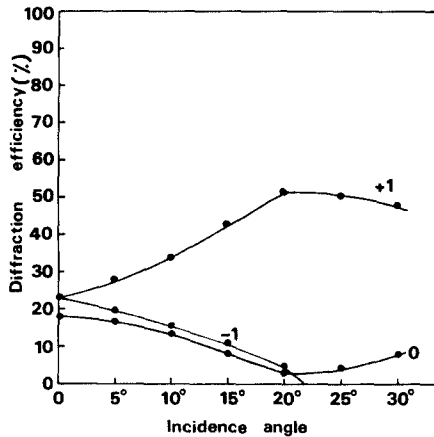


그림 6. 투과형 회절격자의 입사각 변화에 따른 0, +1, -1 차 성분의 회절효율

Fig. 6. Diffraction Efficiency of the 0th, +1st and -1st Order of the Transmission-Type Grating for Various Incidence Angles.

2. 산란된 광량의 측정

회절격자의 성능평가에 있어 회절효율과 더불어 중요한 것은 산란된 광량의 측정이다. 알루미늄이 코팅된 유리기판에 다이아몬드로 홈을 깎아내어 격자를 형성하는 회절격자는 격자간에 주기적인 오차가 많이 생기므로 스펙트럼을 분석할 때 그 파장 이외의 기타 스펙트럼이 나타나며 이는 광 측정시에 광학적인 잡음으로서 나타난다. 반면에 홀로그래픽 방법으로 제작된 표면양각된 회절격자는 앞서의 회절격자에 비하여 주기적 오차는 적으나 현상 과정에서 격자가 엇칭될 때 전체적으로 고르지 못할 경우에 빛의 산란이 발생한다. 산란된 광량을 측정하는 방법은 분광 측정에 사용하는 단색화 장치를 구성하는 것이나 실제로 높은 질의 회절격자의 경우에는 제작된 홀로그래픽 회절격자와 거울에서의 산란된 광량을 같은 조건하에서 비교 측정하는 것이 가장 좋다.¹¹⁾ 실제로 본 연구에서는 포토레지스트를 이용하여 제작한 투과형 및 반사형 회절격자의 산란된 광량을 측정하였으며 반사형의 경우 알루미늄

을 두께 2,000 Å으로 코팅한 알루미늄 거울과 비교하였다.

그림 7 에 산란된 광량을 측정하는 장치를 나타내었다. 회절격자에서 +1 차 성분으로 회절된 빛을 집속 렌즈로 집속시키면 산란되지 않은 빛은 한 점으로 집속되어 슬릿을 통해 검출기로 들어가나 그외 산란된 빛은 그 옆에 희미하게 나타난다. 산란된 광량을 측정하기 위하여 회절격자를 미세한 각도로 회전시켜 슬릿폭의 8 배되는 점까지의 각각의 산란량을 측정하였다. 슬릿폭은 150 μm였으며, 슬릿폭의 8 배 떨어진 점, 즉 회절격자를 2.4mrad 만큼 회전시켰을 때의 단색광에 대한 파장의 detuning은 4nm였다.

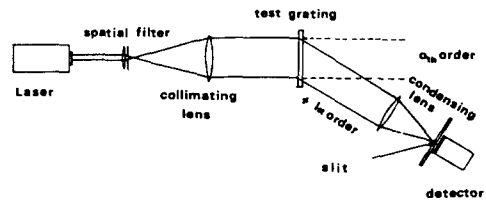


그림 7. 회절격자의 산란된 광량 측정 장치

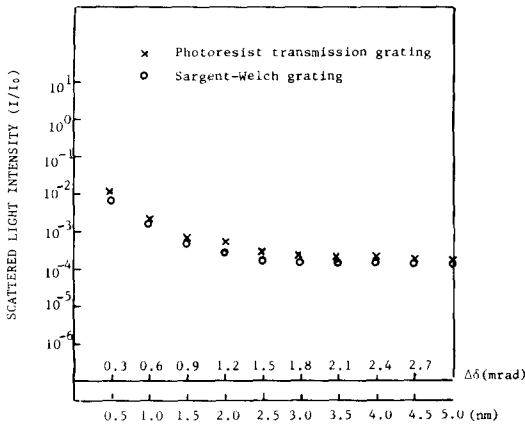
Fig. 7. Optical System for the Measurement of the Scattered Light from the Gratings.

그림 8 에 제작된 투과형 및 반사형 회절격자의 산란된 광량을 나타내었다. 그림 8 (a)는 Sargent-Welch에서 제작한 격자상수가 600lines/mm인 투과형 회절격자와 비교한 것으로 입사된 단색광 파장에서 4nm 떨어진 점에서의 산란된 광량이 10⁻⁴ 정도로 거의 비슷함을 알 수 있다. 그림 8 (b)는 반사형 회절격자와 알루미늄 거울을 상대 비교한 값이다.

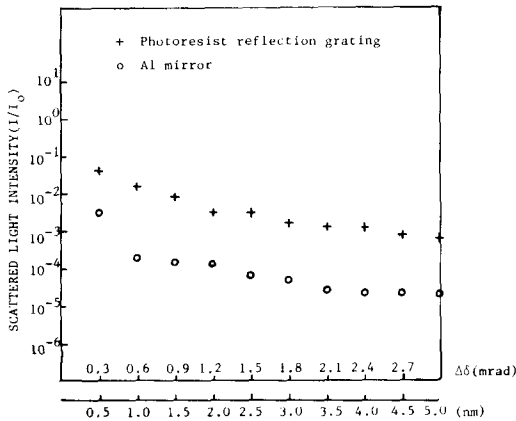
3. 회절격자의 파면 수차 측정

회절격자를 제작하였을 때 회절격자 표면의 평면도가 좋지 않거나 격자가 서로 평행하지 않은 경우에 회절된 광파에 왜곡이 생겨 광 측정기기의 해상도에 영향을 미친다. 파면 수차를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 것은 Twyman-Green 간섭계로서 이때 얻어진 간섭무늬를 통하여 회절격자의 결함을 알 수 있다.¹¹⁾ 그림 9 에 파면 수차 측정 간섭계를 나타내었다.

회절격자의 파면을 보기 위해서 측정하려는 회절격자를 그림 9 와 같이 설치하는데 이때 +1 차로 회절된 빛과 기준 거울에서 들어온 빛이 간섭을 일으키도록 한다. 그림 10에 Twyman-Green 간섭계를 이용하여 제작된 반사형 회절격자를 평가한 간섭무늬를 나타내었다. 그림 10을 통해서 알 수 있듯이 제작된 회절격자



(a) Detuning



(b) Detuning

그림 8. (a) Sargent-Welch사 홀로그래피 회절격자 (600lines/mm)와 비교한 투과형 포토레지스트 회절격자 (1,200lines/mm)의 산란된 광량
(b) 알루미늄 거울과 비교한 포토레지스트 반사형 홀로그래피 회절격자 (1,200lines/mm)의 산란된 광량

Fig. 8. (a) Scattered Light of the Photoresist Transmission-Type Holographic Grating (1,200lines/mm) Compared with Sargent-Welch Holographic Grating (600lines/mm).
(b) Scattered Light of Photoresist Reflection-Type Holographic Grating (1,200lines/mm) Compared with Aluminum Mirror.

의 파면 수차는 $\lambda/2$ 이내로 해상력이 1nm정도인 광학 기기로서 사용하기에 충분하다고 판단된다.

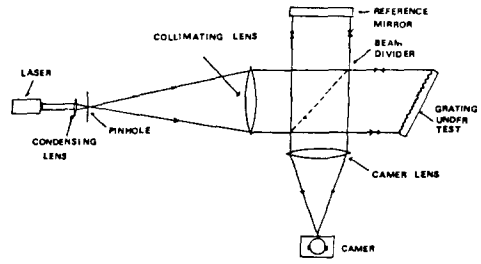


그림 9. 회절광의 파면수차를 측정하기 위한 Twyman-Green 간섭계

Fig. 9. Twyman-Green Interferometer for Measuring Wavefront Aberration of Diffracted Beam.

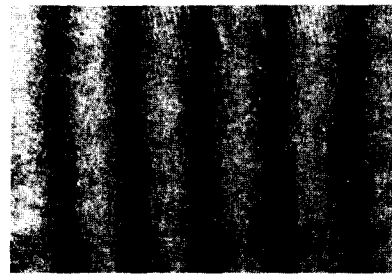


그림10. Twyman-Green 간섭계로 측정된 반사형 회절격자의 파면 간섭무늬

Fig. 10. Wavefront Interferogram of Reflection-Type Grating Obtained with Twyman-Green Interferometer.

V. 결 론

제작된 회절격자의 +1 차에 대한 회절효율은 50%이었으며 산란된 광량은 입사된 단색광 파장에서 4nm 떨어진 경우 10^{-4} 로 측정되었다. 또한 파면 수차 측정 결과 회절격자의 수차는 $\lambda/2$ 이내였다. 이상의 성능평가 결과 본 연구에서 제작된 회절격자는 분광광도계나 분광분석기 등 광학기기의 분광소자로 사용하기에 충분한 것으로 판단된다.

参 考 文 献

[1] T. Tamir and S.T. Peng, "Analysis and design of grating couplers," *Appl. Phys.*, vol.14, pp.235-254, 1977.
[2] C. Shaker and G. Venkata Rao, "Use of holographic optical elements in speckles metrology," *Appl. Opt.* 23, 4592, 1984.
[3] D.J. McManon, A.R. Franklin, *Appl. Opt.* 8, 399, 1969.

- [4] D.H. Close, "Holographic optical elements," *Opt. Eng.* 14, 408, 1975.
- [5] M.J. Beesley and J.G. Castledine, "The use of photoresist as a holographic recording medium," *Appl. Opt.* 9, 2720, 1970.
- [6] M.G. Moharam and T.K. Gaylord, "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings," *J. Opt. Soc. Am.*, 72, 1385, 1982.
- [7] R.C. Enger and S.K. Case, "High Frequency holographic transmission gratings in photoresist," *J. Opt. Soc. Am.*, 73, 1983.
- [8] 이성재, 송재원, 신상영, "집적광학용 격자구조의 제작과 응용", 대한전자공학회 논문집, 21, 39, 1984.
- [9] 송재경, 권영세, "1.3 μ m 파장의 InGaAsP/InP ridge-overgrown distributed feedback 레이저 다이오드의 제작", 한국물리학회, 대한전자공학회 제 1 회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, 5-1, 1986.
- [10] T.K. Gaylord and M.G. Moharam, "Analysis and applications of optical diffraction by gratings," *Proceedings of the IEEE*, 73, 894, 1985.
- [11] Born and Wolf, "Principles of optics," *Pergamon press, fifth edition*, 1975.
- [12] C.V. Shank and R.V. Schmidt, "Optical technique for producing 0.1 μ m periodic surface structures," *Appl. Phys. Lett.*, 23, 154, 1973.
- [13] M.G. Moharam, T.K. Gaylord, "Diffraction characteristics of photoresist surface-relief gratings," *Appl. Opt.* 23, 3214, 1984.
- [14] E. Wolf, *Progress in Optics*, North-Holland, vol.14, 1976.
- [15] G.W. Stroke, "Interferometric measurement of wave-front aberrations in gratings and echelles," *J. Opt. Soc. Am.*, 45, 30, 1955.