

집속이온빔 리소그래피를 이용한 고굴절 비정질 박막 투과 격자 형성

論 文
50C-1-2

Transmission Grating Formation in High Refractive-Index Amorphous Thin Films Using Focused-Ion-Beam Lithography

辛 炯* · 金 鎮 宇** · 朴 正 一*** · 李 賢 勇[§] · 李 榮 鍾^{§§} · 鄭 鴻 培^{§§§}

(Kyung-Shin · Jin-Woo Kim · Jeong-Il Park · Hyun-Yong Lee · Young-Jong Lee · Hong-Bay Chung)

Abstract - In this study, we investigated the optical properties of sub-wavelength a-Si thin film transmission gratings, especially the polarization effect, the phase difference and the birefringence by using linearly polarized He-Ne laser beam (632.8nm). The a-Si transmission grating of the thickness of $< 0.1 \mu m$ with four-type period ($\Lambda = 0.4 \mu m$ and $0.6 \mu m$ for sub-wavelength and $\Lambda = 1.0 \mu m$ and $1.4 \mu m$ for above-wavelength) on quartz substrates have been fabricated using 50 KeV Ga⁺ Focused-Ion-Beam(FIB) Milling and CF₄ Reactive-Ion-Etching(RIE) method. Finally, we obtained the grating array of a-Si thin film with a period $0.4 \mu m$, $0.6 \mu m$, $1.0 \mu m$, $1.4 \mu m$ which have nearly equal finger spacing and width, successfully. Especially, for gratings with $\Lambda = 0.6 \mu m$ (linewidth= $0.25 \mu m$, linespace= $0.35 \mu m$), the η_{MAX} at $\theta_B=17.0^\circ$ is estimated to be 96%. As the results, we believe that the sub-wavelength grating arrayed a-Si thin film has the applicability as the optical device and components.

Key Words : Focused Ion Beam(FIB) milling, polarization effect, birefringence effect, maximum diffraction efficiency

1. 서 론

최첨단 산업의 광통신 정보저장 시스템의 연구와 기술개발이 활발히 진행됨에 따라서 광 집적부품 및 기본 광학소자 개발에 대한 관심이 집중되고 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 광 부품으로는 Calcite와 같은 결정질의 자연석을 이용하고 있어서 집적화가 어렵고, 비용이 많이 드는 단점이 있다. 그러나 최근에 와서 집적광학(Integrated Optics)에 대한 관심이 집중되면서 광원의 파장보다 매우 작거나 비슷한 격자 폭과 간격을 가지는 격자 구조를 이용한 박막 형태의 고 밀도의 광 저장소자를 제작함으로써 기존의 광부품을 대체할 수 있다는 보고가 있는 후, 고 집적화가 가능한 광부품에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다[1],[2],[3]. 즉, 대면적화가 가능하고 제조공정이 단순하여 가격면에서 매우 경제적인 비정질 박막을 이용한 회절광학소자(Diffractive Optical Element : DOE)는 자연석을 이용한 회절격자

의 기능을 대체하리라는 기대를 일으키고 있다. 최근 S.Y.Chou et al.[2]에 의하면 파장이하의 투과격자(Sub-wavelength Transmission Grating, STG)에서의 강한 복굴절 효과는 마스크를 사용하는 전자빔 식각과 RIE공정을 거쳐 제조된 높은 굴절률을 갖는 물질에서 나타나며, 파장이하 투과격자의 편광과 복굴절 효과는 입사빔의 파장(λ)과 격자주기(Λ)에 강하게 의존하며, 주기는 최대 반파장($\Lambda = \lambda/2$)까지 변화시킬 수 있다고 보고되어 졌다. 특히, 주기적인 격자를 통해서 나오는 빛의 상호 간섭에 의해 투과도의 크기를 증가시키는 투과격자는 광원의 파장이하의 미세한 격자를 형성해야 하는 등의 제약으로 인해 아직까지 연구의 진행이 미진한 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 광원(632.8nm)의 반 파장대 이하에서 고 대비도를 가지는 회절광학소자를 개발하기 위하여 미세 선풍가공에 우수한 집속이온빔 식각기술(Focused-Ion-Beam Lithography : FIBL)공정을 이용하여 투과광원의 파장보다 작은 격자간격을 가지는 a-Si 박막 투과격자를 석영기판 위에 형성하고 격자주기에 따른 TE파와 TM파의 투과도의 차이를 측정하므로써 격자주기에 따른 편광효과 및 복굴절 효과와 같은 광학적 특성을 조사하고자 한다.

2. 투과 격자 형성(실험 방법)

우선, Quartz기판 위에 a-Si 박막을 PECVD 방법으로 형성한 후(그림 1a), 그 위에 레지스트로는 Ga⁺-FIB에 대해

* 準 會 員 : 光 云 大 工 大 電 子 材 料 工 學 科 碩 士
 ** 準 會 員 : 光 云 大 工 大 電 子 材 料 工 學 科 碩 士 課 程
 *** 正 會 員 : 光 云 大 工 大 電 子 材 料 工 學 科 博 士 課 程
 § 正 會 員 : 日 本 東 北 大 金 屬 材 料 研 究 所 研 究 員
 §§ 正 會 員 : 驪 州 大 電 子 科 副 教 授 · 工 博
 §§§ 正 會 員 : 光 云 大 工 大 電 子 材 料 工 學 科 正 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 2000 年 8 月 4 日
 最 終 完 了 : 2000 年 12 月 16 日

분해능(resolution) 및 대비도(contrast)가 매우 우수한 a-Se₇₅Ge₂₅ 박막을 열증착 방법에 의해 10⁻⁶Torr의 진공도에서 두께조절기(Inficon-XTC/2)를 이용하여 증착하였다(그림 1b). 기판에 직접적으로 FIB milling 기술을 사용하여 미세한 선폭과 간격을 갖는 패턴을 형성하게 되면 상대적으로 무겁고 높은 이온의 충격으로 인한 손상이 예측되어 레지스트를 완충막(buffer layer)으로 이용하여야 한다.[4],[5] 이때, 레지스트의 두께는 FIB에 의한 손상을 줄이기 위해 Monte Carlo simulation[1] 을 이용하여 Ga⁺ 이온 범위 매개변수와 최소 레지스트 두께 Zmin, 700Å 를 결정하였다.

입사되는 이온빔은 50 keV의 Ga⁺-FIB로 형성된 2중층의 박막 위에서 0.4, 0.6, 1.0, 1.4μm의 격자주기로 레지스트를 밀링(milling)했다(그림 1c, d). 밀링처리를 한 후, a-Si 박막과 a-Se₇₅Ge₂₅ 레지스트 박막을 CF₄가스로 약 11초간 RIE를 수행하여 식각 하였다(그림 1e). 그리고 a-Si 박막 위에 남아 있는 a-Se₇₅Ge₂₅ 레지스트는 HNO₃ : HCl : H₂O (1:1:3) 수용액에 습식 현상을 이용하여 제거하였다(그림 1f).[6] 그림 1은 이러한 과정을 거쳐 완성되어진 a-Si 투과격자 박막의 도해를 나타내고 있다.

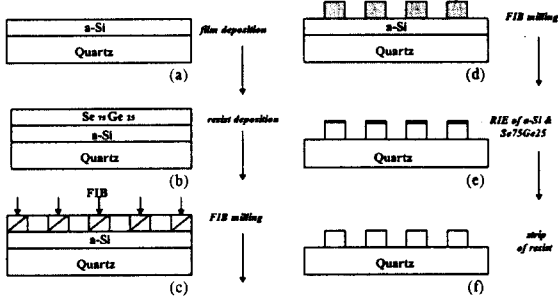


그림 1. FIB 밀링을 이용한 비정질 실리콘 투과격자의 형성도.

Fig. 1. Schematic diagrams of a-Si transmission gratings formed by using FIB-milling.

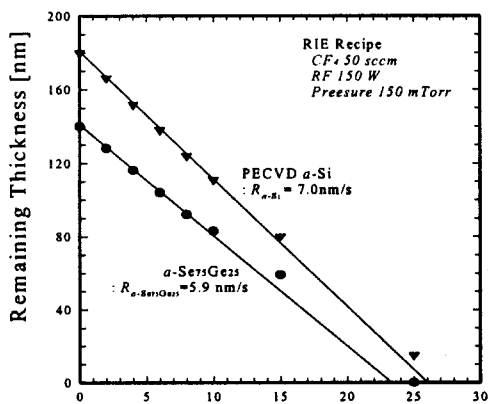


그림 2. CF₄ RIE 에칭에 대한 a-Se₇₅Ge₂₅ (●)와 a-Si (▼) 박막의 시간에 따라 남겨진 두께.

Fig. 2. Thickness of a-Se₇₅Ge₂₅ (●) and a-Si (▼) films remaining against CF₄ reactive ion etching time.

여기서 우선, a-Si 박막과 레지스트로 이용한 a-Se₇₅Ge₂₅ 박막의 실제로 남아있는 두께를 결정하기 위해 각각 두 박막의 CF₄-RIE 에 대한 에칭비율(RSi, RSeGe)을 조사한 결과 그림 2와 같다. 이때 CF₄ 가스압은 150 mTorr이고 rf power는 150w 이다. 그림 2는 에칭시간에 따른 남겨진 박막의 두께를 함수적으로 나타낸 것이며 이 그래프를 통해 11초간의 에칭시간에 따른 a-Si 박막의 두께를 790Å로 결정할 수 있었다.

그림 3은 지금까지의 공정을 거쳐 파장이 λ의 투과격자가 형성된 a-Si 박막을 45° 경사지게 하여 찍은 SEM 사진이다. 그림 3에서 보듯이 격자의 옆면은 완벽하게 수직

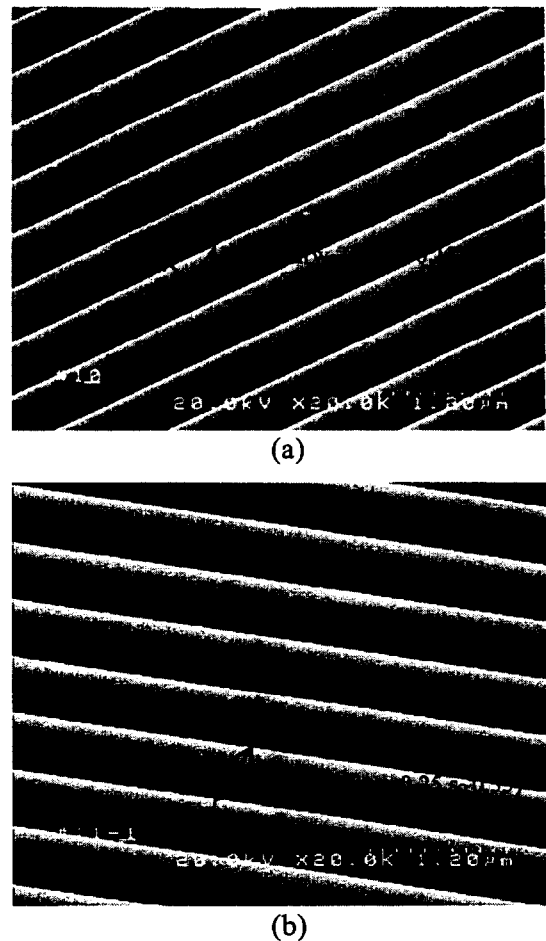


그림 3. FIB 밀링과 CF₄ RIE에 의해 제조된 파장 이하 투과 격자의 SEM 사진: (a) Λ = 0.4 mm, w = 0.27mm, s = 0.13mm와 (b) Λ = 0.60mm, w = 0.25mm, s = 0.35mm. 격자들의 높이는 약 0.08mm.

Fig.3. SEM photographs of subwavelength transmission gratings fabricated by FIB milling and CF₄ RIE: (a) Λ = 0.4 mm, w = 0.27mm, s = 0.13mm and (b) Λ = 0.60mm, w = 0.25mm, s = 0.35mm. The height is about 0.08mm for both gratings.

으로 형성되었으나 완충막의 밀링작업을 수행시, 스퍼터 현상의 영향을 받아 꼭대기 쪽은 원하지 않았던 등근 형태로 가공되어 있다. 그러나 300mm x 300mm 영역에 형성된 투과격자는 광학 특성을 측정하기에 충분한 영역이다.

3. 편광 효과 및 복굴절(실험 결과 및 토의)

입사광원으로 632.8nm의 He-Ne 레이저빔을 사용하여 입사되는 빔을 편광이 패턴 방향에 평행 파 및 편광이 패턴 방향에 수직 파로 분리하여 입사시킴으로서 형성된 투과 격자에 대한 각각의 입사파의 투과도 차이와 위상차이를 격자 간격에 따른 변화로 구하기 위하여 그림 4와 같은 장치를 구성하여 실험을 행하였다.

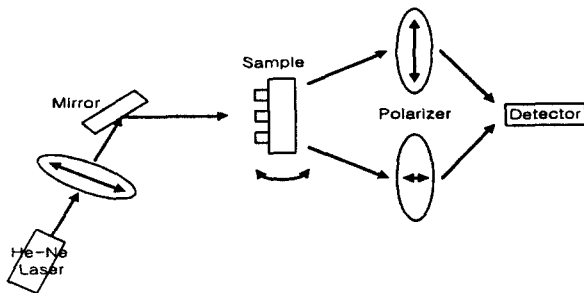


그림. 4. 복굴절 및 회절 효율 측정을 위한 투과형 장치도

Fig. 4. Schematic diagrams to measure the birefringence and the polarization effect.

투과격자배열을 이용하여 굴절률과 변조폭을 높이기 위해서는 고 굴절률의 투과재료가 필요하지만 박막의 투과도 역시 높은 재료를 이용해야 한다. 그러나 고 굴절률의 박막의 투과도는 상대적으로 낮은 값을 보이므로 이를 알아보기 위해 PECVD 방법으로 제조된 a-Si 박막의 복소굴절률을 N&K 박막 분석기(NKT1200)로 측정하였으며 그 값은 $n+ik = 2.9 + i0.05$ 이었다. 본 연구에 사용될 He-Ne 레이저의 파장인 633nm에서 a-Si의 굴절률은 2.9정도이고 소광계수는 0.05로서 무시할 수 있을 정도로 작은 값으로 나타났다. 또한 반사도와 투과도의 실험결과도 630nm의 파장에서 투과도가 반사도보다 큰 것으로 나타나 투과격자로서의 응용이 가능한 것으로 판단되었다.

일반적으로 입사되는 파의 파장이하로 형성된 미세한 격자 배열박막에서의 위상 차는 다음과 같은 식에 의해 구해진다[7],[8],[9].

$$I = I_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\psi}{2}\right) \tag{1}$$

여기서, $\Delta\psi$ 는 위상차이고, I_0 는 미세 격자 배열에 의해 복굴절 되어 나오는 빔으로서 박막에 입사하는 빔의 편광 상태와 평행한 상태의 빔이 가지는 세기이고, I 는 입사 빔과 수직인 상태의 빔이 가지는 세기를 나타낸다. 또, 복굴절, δn 은 식(1)에 의해서

$$\Delta\psi = k \cdot Path_{opt} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot d \tag{2}$$

와 같은 관계를 구할 수 있다. 결국 식(2)를 이용함으로써 위상차 $\Delta\psi$ 를 구할 수가 있으며, 이러한 위상차를 이용하여 박막의 복굴절차, Δn 를 구할 수 있다. 표 1은 위 식을 이용한 실험의 결과를 정리한 것이다.

만약 격자의 투과 형태에서 조사된 빔의 실효굴절률, N_{eff} 이 무시될 수 있다면(예를 들면 $N_{eff} = 1$ 인 경우) 최대 효율, η_{MAX} 은 Bragg 입사각 ($\sin^{-1}\lambda/2\Lambda$)에서 얻을 수 있다. 그러나 실제로 실효 굴절률은 1보다 크기 때문에 회절효율은 $q < \sin^{-1}\lambda/2\Lambda$ 인 범위에서 측정하여야 한다 [10]. 여기서, 회절효율은 입사된 빔 (INCIDENT)에 대한 투과비율 (INCIDENT- I_0 -ORDER)을 의미한다. 이상에서, 얻어진 실험결과를 정리하면 표2와 같다.

표 1. a-Si 투과 격자배열의 광학적 특성

Table 1. Summary of optical properties of a-Si transmission grating array

Material	a-Si			
Thickness	790 Å			
Grating periods	0.4 μ m	0.6 μ m	1.0 μ m	1.4 μ m
Preparation	PECVD			
Substratation	Quartz			
Maximum diffraction efficiency	94%	96%	27%	41%
Phase difference	16.8 °	12.3 °	13.2 °	12.7 °
Birefringence	0.374	0.274	0.294	0.283

표 2. a-Si 투과 격자의 편광 회절 특성

Table 2. The polarization diffraction properties of the a-Si transmission gratings

Λ (μ m)	$\theta_B(N_{eff})$ (°)	$\theta_B(e_{xp})$ (°)	N_{eff} (exp)	I_0 -ORDE R (mW)	η_{MA} x (%)
0.4	52.3	26.0	1.803	0.25	94
0.6	31.8	17.0	1.802	0.16	96
1.0	18.5	10.0	1.821	2.31	44
1.4	13.0	7.0	1.853	2.55	38

여기서, 최대 회절효율, η_{max} 은 Bragg 조건을 만족시키 위해 각각, 52.27° (0.4 μ m), 31.8° (0.6 μ m), 18.45° (1.0 μ m),

13.06° (1.4 μ m)의 각도에서 구한 결과, Chou 등[2]이 제시한 입사파장의 반 파장대 부근의 격자주기에서 강한 회절 효율을 가짐을 알 수 있었으며 특히, 31.8° (0.6 μ m)의 경우 최대 회절효율인 96%의 값을 얻었다. 그리고 그림 4와 같은 측정 장치에서 각각의 편광기를 지난 투과도를 측정한 결과 격자 간격 0.4 μ m인 경우, 입사빔(8.5mW)에 대해서 0.3 mW의 I와 6.4 μ W의 IO 를 얻었다. 따라서 입사파장의 반파장대 이하에서 0.374의 가장 큰 복굴절차를 가짐을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구는 집적광학의 필요성과 더불어 현재 다양한 분야의 응용 가능성이 제안되고 있는 FIBL 기술을 이용한다는 점에서 주목받을 만하다고 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 FIBL 기술을 이용하여 제작된 비정질 실리콘 투과격자 배열을 He-Ne 레이저빔을 통해서 편광 및 복굴절 효과를 조사했다. 그 결과 입사파장의 반파장대 부근의 격자주기에서 96%의 매우 높은 회절 효율을 얻었고, 0.374의 큰 복굴절차를 얻었다.

격자패턴을 형성하는 FIB milling 작업시 큰 에너지를 갖는 이온의 충격으로 a-Si 에 미칠 수 있는 손상을 막기 위해 a-Se₇₅Ge₂₅ 박막을 완충막으로 이용하여 간단한 공정으로 제조할 수 있는 FIB milling 공정을 찾아내었으며 그 공정을 기술적으로 사용하는 방법을 습득하여 단일 물질의 기관에서 집적화에 필요한 미세한 영역에서 STG와 같은 복합요소를 각각 선별하여 작업을 할 수 있는 가능성을 알아내었다.

이상과 같이, 본 연구에서는 파장이하의 a-Si 박막의 투과 격자배열을 제작함으로써 다음과 같은 가능성을 확인할 수 있었다. 투과 격자 배열로 회절 광학 소자의 제작 가능성과 편광기 및 waveplate등으로의 응용 가능성을 확인할 수 있었고, 차세대 집적광학에 직접 연관시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단의 학술 연구비에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. B. Chung, H. Y. Lee, "Ga⁺ focused-ion-beam exposure and CF₄ reactive-ion-etching development of Si₃N₄ resist optimized by Monte Carlo simulation" J. of Vac. Sci. Tech. B. 16(3), pp. 1161-1166, May/June, 1998
- [2] S. Y. Chou, W. Y. Deng, "Subwavelength amorphous silicon transmission gratings applications in polarizers and waveplates" Appl. Phys. Lett. 67(6), pp. 742-744, Aug, 1995
- [3] Lucia. Cescato, Leandro L. Soares, Carlos R. A. Lima, Marco A. R. Aives and Edmundo S. Braga, "Diffractive Optics Produced by Holography and RIE" SPIE Vol. 2778 Optics for Science and New Technology, 1996
- [4] H. Y. Lee and H. B. Chung, "Three dimensional Monte-Carlo calculation of Ga⁺ ion penetration in an a-Se₇₅Ge₂₅ thin film" J. Appl. Phys. 78, pp. 5975-5980, 1995.
- [5] H. Y. Lee and H. B. Chung, "Low-energy Focused-Ion-Beam exposure characteristics of a-Se₇₅Ge₂₅ resist" J. Vac. Sci. Technol. B 15, 818, 1997.
- [6] H. B. Chung, H. Y. Lee, "Dry-etching development characteristics of Se₇₅Ge₂₅ resist for focused-ion-beam lithography" J. of Vac. Sci. Tech. B. 16(4), pp. 1987-1991, Jul/Aug, 1998
- [7] Y. Handa, T. Suhara, H. Nishihara, and J. Koyama, "Scanning-electron-microscope-written gratings in chalcogenide films for optical integrated circuit" Applied Optics, Vol. 18, No. 2, Jan, 1979
- [8] T. Todorov, L. Nikolova, and N. Tomova, "A new high efficiency organic material with reversible photoinduced birefringence" Applied Optics, Vol. 23, No. 23, pp. 4309-4312, Dec. 1984
- [9] F. L. Perotti, "Introduction to Optics", Prentice Hall, Chap16, pp. 323-348 and Chap17, pp. 349-406, 1993

저 자 소 개

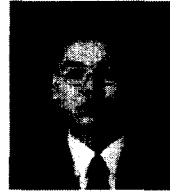


신 경 (辛 炯)

1971년 8월 20일 생. 1998년 광운대 전자재료공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사)

Tel : 02-940-5165, Fax : 02-943-3590

E-mail : shinkc@daisy.gwu.ac.kr



이 현 용 (李 賢 勇)

1964년 3월 14일 생. 1987년 광운대 전자재료공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학). 현재 일본 동북대 금속재료연구소 연구원

Tel : 022-215-2074, Fax : 022-215-2073

E-mail : hyleee@densi.imr.tohoku.ac.jp



김 진 우 (金 鎮 宇)

1973년 1월 4일 생. 1999년 광운대 전자재료공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전자재료공학과 석사 과정

Tel : 02-940-5165, Fax : 02-943-3590

E-mail : pinokiog@explore.kwangwoon.ac.kr



이 영 중 (李 榮 鍾)

1957년 2월 17일 생. 1980년 광운대 응용전자공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학). 현재 여주대 전자과 부교수

Tel : 031-880-5202, Fax : 031-883-5113

E-mail : lyjong@yeojoo.ac.kr



박 정 일 (朴 正 一)

1968년 3월 15일 생. 1995년 광운대 전자재료공학과 석사 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전자재료공학과 박사 과정

Tel : 02-940-5165, Fax : 02-943-3590

E-mail : jipark@explore.kwangwoon.ac.kr



정 흥 배 (鄭 鴻 培)

1951년 1월 19일 생. 1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 광운대 전자재료공학과 교수

Tel : 02-940-5165, Fax : 02-943-3590

E-mail : hbchung@daisy.kwangwoon.ac.kr