

집적광학용 격자구조의 제작과 응용

(Fabrication of Grating Structures and Their Applications in Integrated Optics)

李成宰*, 宋在元**, 申相永**

(Seong Jae Lee, Jae Won Song and SangYung Shin)

要 約

마이크론이하의 주기 즉 격자상수를 갖는 집적광학용 격자구조를 단일모드 및 다중모드 박막도파로위에 홀로그래피 토폴라피(holographic lithography)로 제작하였다. 박막도파로는 현미경 슬라이드유리 및 Corning7059 유리위에 폴리우레탄 용액을 스핀코팅하여 제작하였으며 모드선 스펙트럼 검사법(m-line spectroscopy)을 이용하여 이 도파로의 굴절률 및 두께를 측정하였다. 박막도파로위에 제작된 격자구조는 격자결합기, 모드변환기 및 광속분할기로 동작하는 것을 실험으로 보였으며 또 주기가 변하는 격자구조(chirped grating)에서는 광속확장현상(beam expansion)을 관찰하여 파장분할(wavelength demultiplexing)의 가능성을 보였다.

Abstract

Submicron gratings are fabricated holographically on thin film single mode and multimode waveguides. Thin film waveguides are made by spin-coating polyurethane solution on the substrates of microscope slide glass and Corning 7059 glass. In order to characterize thin film waveguides, the refractive index and the thickness of thin films are measured by using the m-line spectroscopy. The fabricated gratings are tested as a grating coupler, a mode converter, and a beam splitter. Also chirped gratings are fabricated to observe beam expansion phenomena and thus the possibility of the wavelength demultiplexing.

I. 序 論

집적광학에서는 유전체 박막 도파로를 통해 빛을 유도하고, 도파로위에 제작하거나 또는 도파로 자체를 미세하게 변형시켜 만든 소자들을 이용하여 광신호를

처리하게 된다. 그러한 소자들 중에는 격자구조를 모체로 하는 것이 많다. 예를 들면 격자 결합기(grating coupler), 격자 필터(grating filter), 격자렌즈, 광속분할기(beam splitter), 모드변환기(mode converter), 파장 분할 다중화기(wavelength division multiplexer) 등과 같은 수동소자에서부터 분포 피드백 레이저(distributed feedback laser) 등과 같은 능동소자에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있다.¹⁾

본 논문에서는 폴리우레탄(polyurethane) 박막으로 다중모드 도파로 뿐만 아니라 단일모드 도파로를 제작하고 그들의 특성을 측정후, 마이크로이하의 주기

*正會員, 大田機械廠
(Daejeon Machine Depot)

**正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Engineering, KAIST)

接受日字: 1984年 2月 9日

즉 격자상수를 갖는 격자구조를 이용하는 몇 가지 수동 소자들을 제작하여 실험 관찰한 결과를 보고한다.

제 II 장에서는 폴리우레탄 박막 도파로의 제작과정¹⁾과 모드선 스펙트럼 검사법(m-line spectroscopy)에 의한 박막의 특성 즉 박막의 두께 및 굴절률의 측정 결과에 관해 기술한다. 차후 제작할 격자소자들의 특성이 박막 도파로의 특성과 밀접한 관계가 있기때문에 박막 도파로 특성 측정은 가장 기본이 된다.

제 III 장에서는 격자구조의 제작을 설명한다. 마이크로니하의 격자상수를 갖는 격자구조의 제작에는 종래의 포토리토그래피(photolithography)를 이용하기 어렵기때문에 보통 전자빔 리토그래피(electron beam lithography)나 홀로그래프 리토그래피(holographic lithography)를 사용하는데 여기서는 후자를 택하였으며 노출광원으로는 He-Cd레이저($\lambda=442\text{nm}$)를, 포토리지스트로는 AZ1350B를 사용했다.

제 IV 장에서는 제작된 격자소자의 실험 결과를 기술한다. 첫째로 격자 결합기로서 $0.34\mu\text{m}$ 의 주기를 갖는 격자를 제작 실험하여 입력결합(input coupling)과 출력결합(output coupling)현상을 관찰하였는데 결합효율은 약26%이었다. 둘째로 격자에 빛을 비스듬히 입사시켜 TE-TM 모드 변환(mode conversion) 현상과 광속 분할(beam splitting) 현상을 관찰했다. 끝으로 주기가 선형으로 변하는 격자 (linearly chirped grating)를 제작하여 광속 확장(beam expansion)현상을 관찰함으로써 격자렌즈로 동작함을 확인하여, 파장분할(wavelength multiplexing)의 가능성을 보였다.

마지막 장에 결론을 맺는다.

II. 폴리우레탄 박막 도파로 (Polyurethane Thin Film Waveguide)

1. 폴리우레탄 박막 도파로의 제작

현미경 슬라이드 유리(소다 석회 유리) 또는 Corning7059유리를 기판(substrate)으로 하여 그위에 폴리우레탄을 스펀코우팅(spin coating)하는 방법^{12,3)}을 사용하였다. 스펀 코우팅이란 기판위에 액상의 박막 재료를 떨어뜨린 후, 기판을 고속으로 자전시켜 박막을 균일하게 도포시키는 방법이다.

제작과정은 먼저 기판을 세제인 Alconox용액에서 초음파 세척한 다음, 이온이 제거된 물(deionized water)로 헹구어 말린다. 한편 폴리우레탄 용액을 마련하기 위하여 10ml 비이커(beaker)에 레진(resin), 경화제(hardner), 희석제(thinner)를 약 1:1:4의 부피 비율로 넣고 3~5분 정도 잘 휘저은 다음 종이 필터로 여과시킨다. 이와같이 준비된 폴리우레탄 용액을 스펀

코우팅하여 약 1 시간정도 상온에서 건조시킨 다음 다시 65°C 정도에서 1 시간정도 말린다. 폴리우레탄 재료는 한진화학공업주식회사 제품을 사용하였으며, 스펀코우팅의 회전속도와 박막의 두께간의 관련은 표2의 참조가 요망된다.

2. 박막 도파로의 특성측정

도파모드를 정량적으로 관찰하는 방법에는 다음 두 가지가 있다. 첫째는 그림 1 (a)에 보인 바와 같이 도파되는 빛을 다른 하나의 직각 프리즘을 이용하여 출력 결합시킨 후 스크린에 나타난 밝은 모드 선들을 관찰하는 밝은 모드선 스펙트럼 검사법(bright m-line spectroscopy)이다.⁴⁾ 다른 하나는 그림 1 (b)에 보인 바와같이 확장된 광속(光束)을 렌즈로 프리즘 밑면에 집중시키면 대부분의 광속성분은 전반사 현상을 일으키지만 박막도파로의 도파모드로 결합조건을 만족시키는 각(角)스펙트럼(angular spectrum)을 갖는 빛은 박막속으로 도파되어 빠져 나가기 때문에 반사한 광속은 스크린위에서 밝은 바탕에 검은 모드선을 나타내게 되는데 이를 어두운 모드선 스펙트럼 검사법(dark m-line spectroscopy)이라고 한다.⁵⁾ 그림 2와 그림 3은 각각 TE 모드만을 결합시켜 이 두 가지 스펙트럼 검사법으로 측정된 것으로 폴리우레탄 박막도파로가 세개의 모드를 갖는 것을 확인할 수 있다. 다음에 그림 4는 단일모드 박막 도파로를 제작했음을 확인한 검은

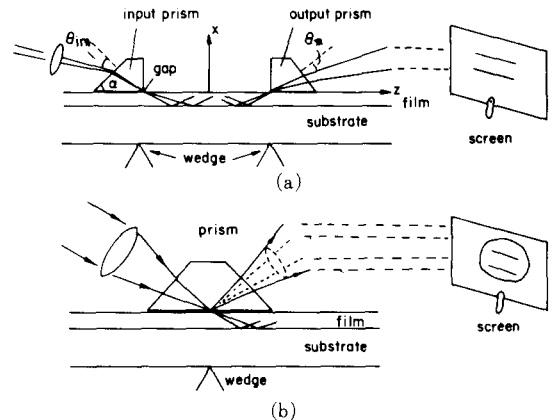


그림 1. 모드선 스펙트럼 검사법의 실험장치도
 α : 프리즘 밑변각, θ_{in} : 입력프리즘 입사각, θ_m : m번째 모드의 출력프리즘에서의 결합각
Fig 1. Experimental setup of the m-line spectroscopy.
(a) Bright m-line spectroscopy.
(b) Dark m-line spectroscopy.

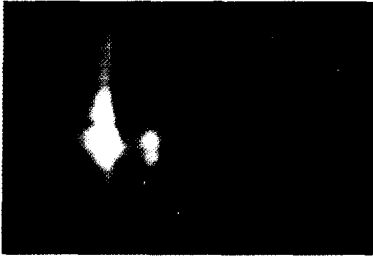


그림 2. 3 개의 TE모드를 갖는 박막 도파로의 밝은 모드선
Fig. 2. Bright m-lines of three TE modes.

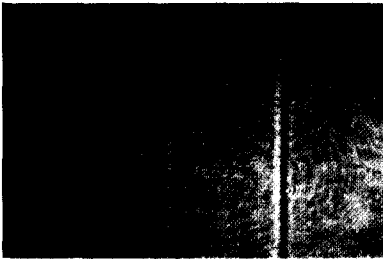


그림 3. 3 개의 TE모드를 갖는 박막 도파로의 어두운 모드선
Fig. 3. Dark m-lines of three TE modes.



그림 4. 단일모드를 갖는 박막 도파로의 어두운 모드선
Fig. 4. Dark m-line of the single mode thin film waveguide.

모드선 스펙트럼 검사 실험사진이다. 또한 그림 5는, TE모드만 결합시키면 세 개의 TE모드선을 보여 주는 박막 도파로가, TM모드도 동시에 여기시키는 경우 원래 TE모드선들 각각 오른쪽에 TM모드선들도 동시에 나타난 것을 보인다. 제작된 박막 도파로의 특성은 공기의 굴절률 $n_c = 1$ 박막의 굴절률 n_f , 두께 d , 기판의 굴절률 n_s 에 의하여 결정된다. 기판의 굴절률 n_s 는 기판의 Brewster각 θ_b 를 측정하면

$$n_s = \tan \theta_b \quad (1)$$

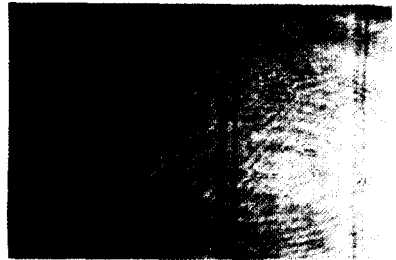


그림 5. 박막도파로에 TE, TM모드를 동시에 여기시켜 관찰한 어두운 모드선. 2 개의 선중에서 오른쪽이 TM모드이다.
Fig. 5. Dark m-lines of the thin film waveguide. TE and TM mode are simultaneously excited, the right side is TM mode in the 2 line pairs.

로부터 쉽게 얻을 수 있다. 현미경 슬라이드 유리와 Corning 7059유리의 Brewster각을 He-Ne레이저로 측정하여 표 1 과 같은 결과를 얻었다. 각도 측정에 사용된 회전대(rotational stage)의 최소 눈금이 5분이므로 각도 측정오차 $\Delta\theta_b$ 를 5분으로 놓으면 충분하여 n_s 의 측정오차 Δn_s 는 식(1)로부터

$$\Delta n_s = |\sec^2 \theta_b| \Delta \theta_b \quad (2)$$

이므로 표 2의 데이터로부터 계산하면 측정오차 $\Delta n_s = 1.5 \times 10^{-3}$ 을 얻는다.

표 1. 측정된 기판의 Brewster 각 및 굴절률
Table 1. Measured Brewster angles of the substrates and the refractive index.

기 판	Brewster 각	n_s
현미경 슬라이드 유리 (소다석회 유리)	56도 35분	1.515
Corning 7059유리	56도 50분	1.530

다음 박막의 굴절률과 두께는 박막 도파로 제작조건에 따라 다르게 되므로 이들 특성은 수시로 측정할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 모드선 스펙트럼 검사법을 보통 사용하는데, 여기서는 밝은 모드선 스펙트럼 검사법을 사용하였다. 그림 1 (a)에서 m번째 모드선이 출력 결합 프리즘 사면의 법선과 이루는 각을 θ_m 이라고 하고 프리즘의 각을 α , 굴절률을 n_p 라 하면, m번째 모드의 실효굴절률(effective index) N_m - 전파정수 β_m 을 진공에서의 파수 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 로 규격화한 양 즉 β_m/k_0 는

$$N_m = \sin \theta_m \cos \alpha + (n_p^2 - \cos^2 \theta_m)^{1/2} \sin \alpha \quad (3)$$

이다. Ulrich와 Torge⁽⁴⁾는 이들 측정치들을, 모드의 전파정수를 구하는 특성방정식에 적용하여 n_f 를 반복법

표 2. 모드선 스펙트럼검사법을 이용하여 측정한 박막도파로의 특성
 n_s : 기판의 굴절율
 n_r : 박막의 굴절율
 d : 박막의 두께
 θ_m : 모드의 결합각
 (): 단일모드의 경우 같은 특성을 갖는 샘플의 값을 그대로 대체한 값 또는 그 값을 이용하여 계산한 값

Table 2. Measured characteristics of the thin film waveguides using m-line spectroscopy.

측정 및 계산 샘플	1	2	3	4
n_s	1.515	1.530	1.515	1.530
스핀속도(rpm)	1.000	1.000	2.000	2.000
θ_0	7.75°	8.00°	7.08°	7.08°
θ_1	5.75°	6.42°	3.51°	
n_r	1.554	1.555	1.555	(1.555)
d	2.11 μ m	2.33 μ m	1.32 μ m	(1.23 μ m)
계산된 모드수	2	2	2	1

으로 계산한 후 d 를 구하는 방법을 제시하였다.

다중모드 박막도파로에서는 두개의 모드에 대하여 N_m 의 측정이 요망되며 단일모드 박막도파로의 경우에는 n_r 와 d 중에 다른 방법을 통해 하나를 구하고 나머지를 특성방정식을 이용하여 계산한다. 후자의 경우 보통 같은 조건에서 도포된 다중모드 박막도파로에서 n_r 를 얻고 이를 단일모드 박막도파로의 n_r 로 보고 두께 d 를 구한다.¹⁴⁾ 이방법에 의한 특성측정의 결과를 표 2에 실는다. 그런데 본 실험에서 제작된 많은 샘플중 그림 2~5의 샘플과 표 2의 샘플은 다른 것이다. 사용한 프리즘의 굴절율 $n_p=1.716$ 이고 $\alpha=60^\circ \pm 5$ 분이다. 측정오차를 산정하기 위하여 샘플 1에 대하여 n_r 와 d 의 측정오차 Δn_r 와 Δd 를 계산해 보았는데 θ_m 이 ± 5 분정도의 오차로 측정되었다고하여 $\Delta n_r=0.002$, $\Delta d=0.12\mu\text{m}$ 를 얻었다. 표 2의 마지막 줄의 계산된 모드수는 측정된 n_r 와 d 값을 특성방정식에 사용하여 얻은 TE모드의 수로써 샘플마다 실험관측한 모드선의 수와 같음을 확인하였다.

III. 격자구조의 제작

마이크론 이하의 격자상수를 갖는 격자구조의 제작은 종래의 포토리토그래피(photolithography)로는 곤란하고 보통 홀로그래피토그래피(holographic lithography)를 이용한다. 포토리토그래피에 비해서 홀로그래피토그래피의 다른 점은 마스크패턴을 이용하지 않으며, 노출광원으로 레이저를 사용한다는 점이다.¹⁴⁾ 이 방법에 의한 격자구조 제작을 위한 장치의 개략

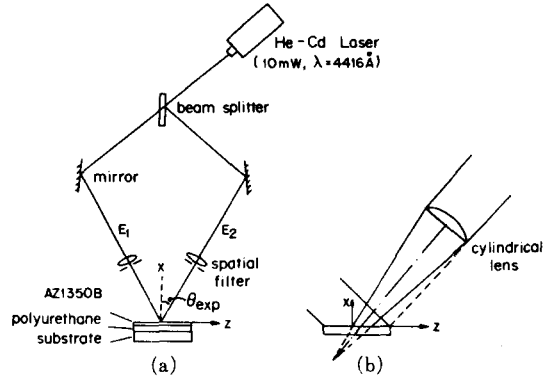


그림 6. 홀로그래피토그래피에 의한 격자구조제작을 위한 노출 장치의 개략도
 (a) 전체구성도 (E_1, E_2 : 한 레이저광원에서 나오는 두 광속, $2\theta_{exp}$: 두 광속의 노출각)
 (b) 선형으로 주기가 변하는 격자구조를 얻기 위한 부분구성도 (한 쪽 광속을 기둥모양의 렌즈로 집중시킨다.)
 Fig. 6. Schematic diagram of the exposure equipment for the grating fabrication using the holographic lithography.
 (a) Whole diagram (b) Part diagram for the linearly chirped grating.

도를 그림 6에 보여 준다. He-Cd레이저에서 나온 광속은 광속분할기(beam splitter)로 둘로 나눈다. 이 두 광속은 각각 공간여과기(spatial filter)통과 후 AZ 1350B 포토리지스트가 도포된 샘플위에 비춘다. 두 광속 E_1, E_2 가 각 $2\theta_{exp}$ 로 박막도파로 위에서 만나면 간섭이 생기고 이 간섭무늬에 의해서 포토리지스트가 감광된다. 이때 간섭무늬의 격자상수 Λ 는

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{exp}} \tag{4}$$

로 주어진다.¹⁴⁾ 여기서 λ 는 노출광원으로 쓰이는 레이저의 파장을 나타낸다. 또한 그림 6 (b)에서 처럼 한쪽 광속을 기둥모양의 렌즈(cylindrical lens)를 써서 집중시켜 주면 주기가 선형으로 변하는 격자(linearly chirped grating)를 제작할 수 있다.

이상을 바탕으로 제작과정을 요약하면 다음과 같다. 먼저 앞장에서 설명한 박막도파로위에 AZ1350B 포토티브 포토리지스트 3000rpm으로 스펙코팅한다. (네가티브에 비해 포토티브 포토리지스트가 보통 해상도가 좋다.) 그리고 80~85°C에서 25분간 프리베이크(pre-bake)하고 그림 6과 같은 장치를 이용하여 노출을 한다. 노출광원은 10mW의 He-Cd 레이저($\lambda=442\text{nm}$)를 사용하며 광속의 직경이 약 1.4cm정도일 때 2~3분간 노출한다. 다음은 현상과정으로 AZ1351현상액과 이온이 제거된 물 1:3의 혼합액에 샘플을 담그고 천천히

저으면서 30초간 현상한다. 그리고 마지막으로 130℃ 정도에서 30초간 포스트베이크(post-bake)한다.

VI. 격자구조의 응용 실험

1. 격자 결합기(Grating Coupler)

박막도파로위에 빛을 진입시키기 위해 쓰이는 소자를 결합기(coupler)라 한다. 실험실에서 보통 쓰이는 방법은 프리즘 결합기(prism coupler)인데 결합효율은 높은 반면 취급이 불편하다. 이에 비하여 격자결합기(grating coupler)는 결합효율은 떨어지지만 박막평면위에 집적화할 수 있으며 취급이 용이하다. 격자에 각 θ_i 로 입사하는 빛의, 박막도파로의 도파방향으로 분기중에서의 전파정수를 $\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_i$ 라 하면 주기적인 격자구조에 의해 생성된 공간고조파(spatial harmonics)의 전파정수 β_n 은

$$\beta_n = \beta_i + \frac{2\pi}{\Lambda} n \quad (5)$$

으로 된다. 단 λ 는 사용되는 빛의 파장이고, n 은 정수로서 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 이며 Λ 는 격자구조의 격자상수이다. 도파로의 전파정수를 β_g 라 할 때 β_n 이 β_g 와 일치하게 되면 그 도파모드는 여기된다. 만약 Λ 를 $|\beta_{-1}| = \beta_g$ 이고 $n \neq -1$ 인 모든 정수에 대해 $|\beta_n| > \beta_g$ 가 만족되도록 설계하면 역방향으로 결합이 일어

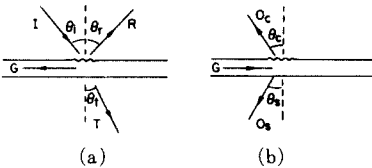


그림 7. 격자구조의 역방향 결합기 I:입력빔, R:반사빔, T:투과빔 G:결합된 빔, O_c 및 O_s : 출력결합빔, θ_i : 입사각, θ_r : 반사각 θ_t : 투과각, θ_c 및 θ_s : 출력결합각
(a) 입력결합인 경우 (b) 출력결합인 경우

Fig. 7. Reverse grating coupler.
(a) Input coupler (b) Output coupler.

난다. 이때 높은 차수의 광속들은 제거되며 그림 7에 보인 바와같이 효율이 높은 역방향 결합기를 얻을 수 있다.^{17,18} 그림 7 (a)와 (b)는 각각 입력결합 및 출력결합인 경우를 나타낸다. 실제 실험을 위해 격자상수 Λ 가 $0.34\mu m$ (격자상수는 격자의 Littrow각 즉 입사빔이 회절빔으로 되돌아 나올 때의 입사각을 측정하여 알 수 있음)인 격자결합기를 제작하였으며, 도파실험을 위한 광원으로 He-Ne레이저를 사용했다.

그림 7 (a)의 구조에서 관찰된 입력결합현상을 그림 8에 보여주고 있다. 샘플의 가운데 밝은 점이 격자구조 입력결합기가 있는 곳으로 레이저 빔이 샘플의 앞면 오른쪽에서 비스듬히 이점으로 입사하는데, 역방향 결합되어 박막도파로에 도파하는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 그림 7 (b) 구조의 출력결합기에서 관찰된 출력빔의 스크린에 비친 빔 패턴으로 3개 모드를 볼 수 있다. 또 그림 7 (a)의 구조에서 I, R, T의 상대적인 크기를 측정하여 결합효율을 계산하였는데 약 26% (I: R:T=3.1:0.3:2.0)를 얻을 수 있었다.

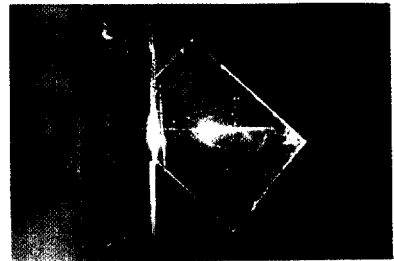


그림 8. 격자 결합기를 이용한 입력결합현상
Fig. 8. Input coupling using the grating coupler.

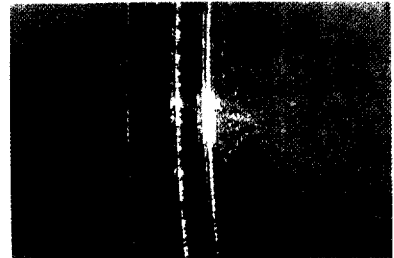


그림 9. 격자 결합기를 이용한 출력결합현상으로 부터 관찰한 모드선
Fig. 9. Observed m-lines from the output coupling by using the grating coupler.

2. 모드변환기/광속분할기
(Mode Converter/Beam Splitter)

격자를 결합기 또는 필터로 사용하는 경우에는 빛이 격자에 수직으로 입사하지만 그림 10과 같이 박막도파로의 도파모드가 격자에 비스듬히 입사하는 경우에는 TE-TM모드 변환기 또는 광속분할기등으로 사용할 수 있다.¹⁹ 특히 입사각이 45° 근처에서 위상정합조건(Bragg조건)이 만족되도록 격자상수 Λ 를

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2\beta_g \cos 45^\circ = \frac{4\pi}{\lambda} n, \cos 45^\circ \quad (6)$$

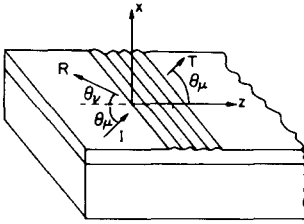


그림 10. TE-TM 모드변환 및 광속분할을 보여주는 구조

I: 입사빔, R: 반사빔, T: 투과빔, θ_μ : 입사각, θ_v : 반사각 I, R, T 세개의 빔은 모두 포파모드이다.

Fig. 10. Structure for the observation of TE-TM mode conversion and beam splitting.

으로 선택하면 TE-TM모드변환 효과가 최대가 되므로, 이와같이 설계하여 격자상수가 $0.35\mu\text{m}$ 인 격자를 제작하였다. 이 격자에 TE 모드 입사파를 45° 로 진입시켜, 나타난 반사파의 편극을 조사한 결과 TM모드임을 확인할 수 있었다. 이 현상을 보여주는 샘플사진이 그림11인데, 왼쪽에서 오른쪽으로 도파하는 레이저빔이 가운데 부분에 있는 격자구조를 만나 모드 변환되어 위쪽으로 도파하는 것을 볼 수 있다. 또 이 그림에서 일부 빔이 격자구조를 투과하므로 광속분할 (beam splitting)현상을 보여 준다.

3. 광속확장기/파장분할기

(Beam Expander/Wavelength Demultiplexer)

박막도파로에 제작된 주기가 변하는 격자(chirped grating)에 각 스펙트럼 분포를 갖는 빛이 입사하게 되면 스펙트럼성분마다 Bragg조건을 만족하는 영역이 조금씩 달라지므로 광속확장 (beam expansion)현상을 나타낸다. 또한 이러한 격자구조에 여러 파장성분을 갖는 빛이 입사하는 경우 파장에 따라 Bragg 조건을 만족하는 영역이 달라져 파장분할기(wavelength demul-



그림 11. 격자구조에 의한 TE-TM 모드 변환 현상 및 광속 분할 현상

Fig. 11. Observed TE-TM mode conversion and beam splitting by the grating.

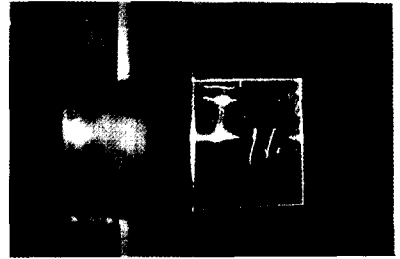


그림 12. 주기가 변하는 격자구조에 의한 광속확장현상

Fig. 12. Observed beam expansion by the chirped grating.

tiplexer)로 사용가능하다. 실험을 위하여 격자상수가 가운데에서 $0.35\mu\text{m}$ 이고 격자의 길이 1cm에 걸쳐 격자상수가 570\AA 정도로 선형으로 변하는 격자구조를 제작하여 광속확장현상을 관찰하였다. 이를 보여주는 샘플사진이 그림12인데 그림11과 비슷하나 격자구조가 달라서 광속이 확장된다. 그리고 파장분할기 실험을 위해서는 파장을 가변시킬 수 있는 레이저가 필요한데, 실험관찰은 하지 않았으나 광속확장현상으로부터 파장분할기로서의 가능성을 볼 수 있다.

V. 결론 및 검토

폴리우레탄을 재료로 박막도파로를 제작하여 굴절률과 두께를 모드선 스펙트럼 검사법을 이용하여 측정하였다. 박막도파로 위에 다시 포지티브 포토리지스트 AZ1350B를 재료로 하고 홀로그램리토그래피로 마이크로 이하의 격자상수를 갖는 격자구조를 제작하였다. 이것을 격자결합기로 이용하여 약26%의 결합효율을 얻었다. 또한 도파모드의 빛이 격자에 비스듬히 입사하는 경우에 모드변환현상과 광속분할현상을 관찰하였다. 그리고 주기가 변하는 격자구조에서 위의 두 현상 외에도 광속확장현상을 관찰하여 파장분할기로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

파장분할기에 대한 구체적인 실험 및 2차원격자나 곡선형격자(curved grating)^{10,11}에 대한 응용 실험이 차후 연구과제로 남아 있다.

参 考 文 献

[1] A. Yariv and M. Nakamura, "Periodic structures for integrated optics," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-13, no. 4, pp. 233, 1977.
 [2] R. Ulrich and H. P. Weber, "Solution-

- deposited thin films as passive and active light-guides," *Applied Optics*, vol. 11, no. 2, pp.428, 1972.
- [3] 박홍준, 권영세, "유기물 박막에서의 광도파현상," 전자공학회지, 제19권, 제5호, pp.5, 10월, 1982년.
- [4] R. Ulrich and R. Torge, "Measurement of thin film parameters with a prism coupler," *Applied Optics*, vol. 12, no. 12, pp. 2901, 1973.
- [5] J.S. Wei and W.D. Westwood, "A new method for determining thin film refractive index and thickness using guided optical waves," *Applied Physics Letters*, vol. 32, no. 12, pp. 819, 1978.
- [6] W.W. Ng, C.S. Hong, and A. Yariv, "Holographic interference lithography for integrated optics," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, pp. 1193, 1978.
- [7] T. Tamir ed., *Integrated Optics*. Springer-Verlag, New-York, 1975.
- [8] M.L. Dakss, L. Kuhn, P.F. Heidrich, and B.A. Scott, Grating coupler for efficient excitation of optical guided waves in thin films," *Applied Physics Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 523, 1970.
- [9] K. Wagatsuma, H. Sakaki, and S. Saito, "Mode conversion and optical filtering of obliquely incident waves in corrugated waveguide filters," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-15, no. 7, pp. 632, 1979.
- [10] A. Yi-an, C.D.W. Wilkinson, and P.J.R. Laybourn, "Two-dimensional grating unit cell demultiplexer for thin film optical waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-15, no. 10, pp. 1089, 1980.
- [11] P.K. Tien, "Method of forming noval curved-line grating and their use as reflectors and resonators in integrated optics," *Optics Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 64, 1977.
-