

論文99-36D-7-6

단일모드 광섬유와 다중모드 평면도파로의 소산장결합을 이용한 광필터의 동작특성 측정

(Measurement of Behaviors of Optical Filter using Evanescent Field Coupling between Single Mode Fiber and Multimode Planar Waveguide)

金光鐸*, 劉虎種*, 宋在元*, 金時弘**, 姜信元**

(Kwang Taek Kim, Ho Jong Yu, Jae Won Song, Si Hong Kim, and Shin Won Kang)

요 약

측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유와 평면도파로의 소산장 결합을 이용한 광필터의 동작특성을 측정할 수 있는 간단한 방법이 제안되었다. 측면이 연마된 하나의 광섬유 블록(block)과 실리콘 산화막위에 평면도파로를 독립적으로 제작한 후 특성을 측정하기 위하여 물리적 압력으로 광결합을 시켰다. 굴절률이 다른 몇 가지 폴리머를 평면도파로의 코어층으로 이용하였다. 이 측정방법으로 소자제작 과정에서 광 결합기의 중심파장, 대역폭, 소멸비, 그리고 편광 의존성들이 간단하게 측정될 수 있다. 광도파로 물질의 굴절률이 높을수록 파장선택성이 높아졌다. 평면도파로의 대칭적 도파로 구조와 도파물질의 등방성 때문에 편광의존성이 작게 나타났다. 삽입손실은 0.5dB이하였다. 본 연구에서 제안한 측정방법은 광섬유와 평면도파로 결합기를 이용한 광변조기와 광필터등 다양한 소자개발에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper we proposed a simple measurement method to find the behaviors of the fiber-to-waveguide coupler. The polished fiber blocks and planar waveguides on silicon dioxide were fabricated independently and then optically coupled by physical pressure. Several kinds of polymer with different refractive indices were used for waveguide films. The proposed method makes it possible to measure the center wavelength, bandwidth, extinction ratio, and polarization dependence of the coupler during fabrication procedure. The wavelength sensitivity increased with refractive index of polymer. The symmetric planar waveguide structure and isotropic property of guiding materials reduced polarization dependent property. Insertion loss of the coupler was less than 0.5 dB. It is expected that our measurement method is useful for developing various optical devices using evanescent coupling between polished fiber and planar waveguide such as optical modulators and filters etc.

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部
(School of Electrical and Electronic Engineering,
Kyungpook National University)

** 正會員, 慶北大學校 센서공학과

(Department of Sensor Engineering, Kyungpook
National University)

接受日字:1999年3月24日, 수정완료일:1999年6月3日

I. 서 론

광 섬유상에서 광학적 기능을 가지는 소자들은 패키징이 간단하여 신뢰성이 높고 삽입손실이 무시할 수 있을 정도로 작다. 지금 까지 다양한 광섬유형 광학소자들이 개발되고 있으며 대표적으로 브래그 격자형 광필터^{[1], [2]}, 광전력 분배기^[3], 편광변환기^[4] 등이 잘 알려져 있다.

최근에는 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유와 평면도파로 사이의 소산장 결합(evanescent field coupling)을 이용한 광 결합기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이 소자는 광섬유를 절단하지 않고 제작이 가능해서 삽입손실이 매우 작고 능동형 광학소자로 적용되기 쉽다. 평면도파로의 높은 분산특성을 이용하면 높은 파장선택성을 가지는 대역제거 광필터로 동작함을 C. Millar등이 최초로 실험적으로 증명하고^[5], D. Marcuse는 직선 광섬유와 평면도파로가 결합된 구조의 동작특성을 결합모드이론으로 분석하였고^[6], 그후 Krassimir P. Panajotov등은 구부러진 광섬유와 평면도파로가 결합된 구조까지 확장하여 결합모드 이론을 적용하여 실험결과와 잘 일치함을 증명하였다^[7]. 최근에는 광섬유-평면도파로 결합기(fiber-to-planar waveguide coupler)가 평면도파로의 물질의 전기광학 효과나 열광학효과를 이용하여 광변조기나 파장가변 광필터 등으로 이용 될 수 있음이 보고되고 있다^{[8], [9], [10]}. 이러한 소자의 특성을 결정짓는 대역폭, 중심파장, 소멸비, 그리고 편광의존성 등을 소자구조로서 최적화 시키려는 연구는 아직 부족한 상태이다. 기존에 보고된 소자들은 전기광학 물질의 복굴절이나 평면도파로의 비대칭적 구조에서 발생하는 편광의존성이 매우 큰 것이 단점이다. 실제로 광섬유상에서 광의 편광상태가 바뀌기 쉽기 때문에 광통신 시스템의 안정적 동작을 위해서 광학소자는 편광의존성이 없는 동작특성이 요구된다. 기존에는 광섬유-평면도파로 광결합기(fiber-to-planar waveguide coupler)의 특성들 파악하기 위하여 Cargille oil을 이용하여 평면도파로의 상부클래딩의 굴절률만 바꾸는 방법을 이용하였다^{[5], [11]}. 그러나 이 소자의 정확한 특성을 파악하기 위해서는 평면도파로 코어의 굴절률과 두께, 평면도파로와 광섬유의 간격 등을 변수로 설정해야 하기 때문에 기존의 측정방법으로는 소자특성에 대한 많은 정보를 얻기 힘들다.

본 논문에서는 평면도파로의 코어층의 굴절률과 두께, 그리고 평면도파로와 광섬유 사이의 간격등을 달리하면서 측면 연마된 광섬유와 평면도파로가 결합된 광필터의 동작특성을 쉽게 측정하는 방법을 제안하고 실험으로 증명하였다. 굴절률이 다른 몇 가지 폴리머를 평면도파로의 코어층으로 사용하여 소자가 제작되었다. 측면 연마된 광섬유 블록은 광섬유를 적당히 구부린 상태로 수지와 함께 경화시킨 후 연마하는 방법으로 만들어졌다. 그리고 평면도파로는 실리콘 산화막 위에 독립적으로 제작되었다. 실리콘 산화막은 평면도파로의 상부클래딩으로 작용하며 굴절률이 표준 광섬유의 클래딩과 일치한다. 연마된 광섬유 블록과 평면도파로를 프리즘 결합장치와 비슷하게 물리적 압력으로 결합시킨 후 광섬유-평면도파로 결합기의 특성을 관측할 수 있었다. 이러한 방법으로 결합기의 광학적 구조를 바꾸어 가면서 특성을 측정할 수 있었다. 이방은 하나의 측면 연마된 광섬유 블록으로 여러 개의 평면도파로 샘플에 반복하여 사용될 수 있기 때문에 실험과정이 단순하다.

II. 광필터의 동작 원리

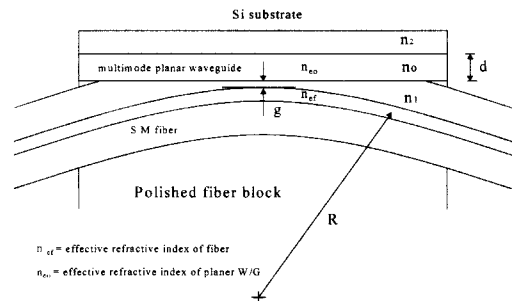


그림 1. 측면 연마된 광섬유와 평면도파로의 소산장 결합을 이용한 광필터 구조

Fig. 1. Structure of optical filter using evanescent field coupling between side polished fiber and planar waveguide.

그림 1과 같이 측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유와 다중모드를 가지는 평면도파로의 소산장 결합(evanescent field coupling)이 형성되면 두 광경로 사이에 광에너지 교환이 발생할 수 있다. 평면도파로는 여러 모드를 가질 수 있으며 그 중에 광섬유 모드와 위상정합(phase matching) 조건을 만족하는 모드만 광 결합을 일으킨다. 평면도파로의 코어층과

클래딩의 굴절률 차이를 크게 하면 매우 높은 분산특성이 얻어진다. 즉 평면도파로의 유효굴절률이 파장에 따라 크게 달라진다. 따라서 광섬유와 평면도파로의 유효굴절률은 특정한 파장과 모드에서 일치하게 되며 이때 광섬유로부터 입사된 광전력은 평면도파로 방향으로 이동하게 되고 이러한 현상은 대역제거 광필터(bandstop filter)로 작용한다. 여기서 위상정합을 가장 잘 만족하는 광의 파장을 편이상 중심파장으로 정의하기로 한다. 표준 단일모드 광섬유의 코어층과 클래딩층의 굴절률 차이는 0.01~0.001 정도로서 매우 작으며 이것의 유효굴절률은 클래딩층보다 크고 코어보다 작은 범위 안에 있다. 따라서 광섬유의 파장에 대한 유효굴절률의 변화는 매우 미약하다. 평면도파로의 분산특성을 크게 할수록 광 필터의 파장선택도는 높아진다. 다중모드를 가지는 평면도파로의 m번째 모드의 유효굴절률을 찾기 위한 고유치 방정식은 다음과 같다^[11].

$$\frac{2\pi d}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \psi_1 + \psi_2 \quad (1)$$

여기서 m은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ 는 광의 파장, d는 평면도파로의 코어층 두께, n_o 는 평면도파로의 코어 굴절률 그리고 n_{eo} 는 m번째 모드의 유효굴절률이다. ψ_1 과 ψ_2 는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상천이로서 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \zeta \frac{(n_{eo}^2 - n_i^2)^{1/2}}{(n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 ζ 는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광 대해선 $\zeta=1$, TM편광에 대해선 $\zeta=n_o^2/n_i^2$ 을 대입하면 된다. n_1 은 광섬유의 클래딩층의 굴절률인 동시에 평면도파로의 하부클래딩층의 굴절률이다. n_2 는 평면도파로의 상부클래딩층의 굴절률이다. 평면도파로의 최고차 모드가 가장 작은 유효굴절률(n_{eo})을 가지기 때문에 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})과 가장 근접하게 된다. 식(1)에서 ψ_i 가 편광에 따라서 다른 값을 가지므로 평면도파로의 유효굴절률이 편광상태에 따라 다소 차이가 발생할 수 있다.

광 소자의 특성으로 편광에 의존하지 않는 성질이 필요하다. 그림 1과 같은 광소자의 편광의존성을 줄이는 방법으로 ψ_i 의 절대치를 최소화시키는 기법이 유용하다. 이를 위하여 평면도파로의 상부클래딩 물질로

광섬유의 클래딩과 같은 물질을 사용하는 방법이 이용될 수 있다. 위상정합식 $n_{eo}=n_{ef}$ 를 만족하고, 광섬유의 코어와 클래딩간의 굴절률 차이가 작기 때문에 $n_{ef} \approx n_i$ 를 식(2)에 대입하면 평면도파로의 상하부의 계면에서 발생하는 위상천이는 매우 작아진다. 그리고 모드의 차수(m)가 높을수록 ψ_i 가 식(1)에서 상대적으로 작아지기 때문에 편광상태에 따른 중심파장의 차이가 줄어든다. 이때 사용된 물질은 광학적 등방성으로 가정하였다. 평면도파로가 대칭적 구조일 때 정성적 해석을 위해 식(1)에서 오른쪽항의 ψ_i 를 무시하면 아래와 같은 간단한 식이 유도된다.

$$2d(n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2} \approx m\lambda_0 \quad (3)$$

여기서 λ_0 는 평면도파로의 m차 모드와 광섬유 모드의 사이의 위상정합을 만족하는 중심파장이다. 중심파장은 식(3)으로부터 평면도파로의 두께(d)와 굴절률(n_o)에 의해 결정된다. 그리고 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})은 광섬유의 구조와 파장에 의해 계산될 수 있는 수치이다. 여기서 m은 λ_0 에서 가질 수 있는 모드의 차수 중에 최고차이다. 평면도파로의 m+1차 모드에 위상정합을 만족하는 파장을 λ_1 으로 정의하면 다음 식을 만족한다. 여기서 위상정합 조건을 만족할 때 평면도파로의 m+1차 모드와 m차의 유효굴절률은 광섬유의 유효굴절률과 일치하며 평면도파로와 광섬유 물질의 고유한 색 분산은 고려되지 않았다.

$$m\lambda_0 \approx (m+1)\lambda_1 \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하면 근접한 중심파장간격($\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_1$)은 다음과 같다.

$$\Delta\lambda = \frac{2d\sqrt{(n_o^2 - n_{ef}^2)}}{m(m+1)} \quad (5)$$

식(5)에서 평면도파로의 굴절률(n_o)이 일정할 때 평면도파로 코어의 두께(d)를 늘리면 모드의 차수(m)가 대체로 비례해서 커지기 때문에 $\Delta\lambda$ 가 감소한다. 만일 실험으로 $\Delta\lambda$ 를 측정하면 각 중심파장의 모드 차수를 다음과 같이 쉽게 찾을 수 있다.

$$m \approx \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} \quad (6)$$

여기서 모드의 차수는 평면도파로의 굴절률과 두께와 관계없이 계산된다. 광섬유와 평면도파로 물질의

고유 분산을 고려하면 식(6)에서 계산되는 모드 차수는 정수가 아닐 수 있다.

III. 광 필터 제작

본 논문에서 사용한 광섬유와 평면도파로 물질의 광학적 특성을 표1에 제시하였다.

본 논문에서 측면 연마된 광섬유 블록과 폴리머 필름을 독립적으로 제작한 후 물리적 압력으로 광섬유와 평면도파로를 결합시키기 위한 장치를 제작하였다. 이 장치는 평면도파로의 굴절률을 측정하기 위한 프리즘 결합장치와 유사한 구조로서, 이것을 이용하면 하나의 연마된 광섬유 블록이 여러 가지 폴리머 필름에 반복하여 적용될 수 있다. 폴리머 평면도파로의 상부 클래딩층으로 광섬유 클래딩과 같은 굴절률을 가지도록 실리콘 산화막(SiO₂)을 이용하였다. 단일모드광섬유를 1m 정도 자른 후 광섬유의 중간부분에서 4cm정도 피복을 벗겨낸다. 곡률반경이 10cm가 되도록 유지시키고 연마를 위해 경화수지와 함께 5시간 정도 경화시킨다. 12μm 연마 필름으로 연마하면서 광섬유에 파장 633nm인 He-Ne 레이저광을 입력시켜 연마된 부분에서 산란광이 보일 때까지 연마한 후 3, 1, 0.3μm 연마필름으로 광섬유의 표면연마를 마무리한다. 연마시간으로 광섬유 클래딩의 두께를 조절하면서 광필터의 중심파장에서 소멸비를 실시간으로 관측하였다.

표 1. 광섬유와 평면도파로물질의 광학적 특성
Table 1. Optical properties of fiber and planar waveguide materials.

항 목	수 치	비 고
평면도파로 상부굴절률(n ₂)	1.4440	@ 1.55μm
광섬유 코어 굴절률	1.4485	
광섬유 클래딩 굴절률(n ₁)	1.4440	
광섬유 코어지름	8.2[μm]	
광섬유 곡률반경(R)	10[cm]	
AZ4562의 굴절률	1.585	도금용 포토레지스터
PLA900의 굴절률	1.587	도금용 포토레지스터
NOA61의 굴절률	1.537	자외선 경화에폭시
NOA65의 굴절률	1.505	자외선 경화에폭시

한편 평면도파로는 습식산화된 실리콘 기판에 폴리머를 스펀코팅하는 과정으로 준비하였다. 실리콘 산화

막의 두께는 0.9μm 부근이었다. 폴리머 필름은 도금용 포토레지스터로 이용되는 AZ4562와 PLA900, 그리고 UV 경화 에폭시인 NOA61과 NOA65를 이용하였다. 이들 물질은 비교적 두꺼운 평면도파로 제작이 용이하였고 굴절률은 파장 1.55μm에서 프리즘 결합장치 [METRICON PC2010]를 이용하여 측정하였다. 실리콘 산화막위에 형성된 평면도파로와 측면이 연마된 광섬유 블록을 적당한 압력으로 접합시키면 광섬유형 광 필터로 동작한다.

IV. 특성측정 및 결과분석

본 논문에서 제작된 광섬유-평면도파로 광 필터의 특성을 측정하기 위한 광학계의 구성은 그림 2와 같다.

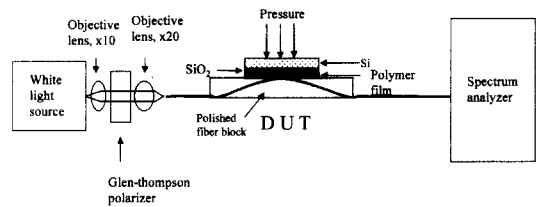


그림 2. 제작된 소자의 특성을 측정하기 위한 광학장치도

Fig. 2. Optical set-up to measure the optical properties of fabricated devices.

그림 2와 같이 백색광원의 광출력을 ×10 대물렌즈로 평행광을 만든 후 글렌-톰슨(Glen-Thompson) 편광기로 입력광의 편광상태를 제어하고 ×20 대물렌즈로 광섬유에 결합시킨다. 이때 광섬유의 양호한 단면상태가 효과적인 광 결합을 얻는데 아주 중요하다. 그리고 광섬유를 끈게 펼쳐서 광이 광섬유를 진행하는 동안 편광상태가 바뀌지 않도록 주의해야한다. 측정에 사용된 백색광원과 스펙트럼 분석기는 안리츄(Anritsu)사의 모델 MG922A와 MS96A이다. FC 광 커넥터가 부착된 단일모드 광섬유를 이용하여 백색광원의 출력을 광 스펙트럼 분석기에 입력해서 해상도 5~10nm로 측정해본 결과 측정범위 1.2 ~ 1.6μm 파장 범위에서 광 전력이 -60dBm으로서 균일한 전력 분포를 보여 주었지만 스펙트럼 분석기의 최소 측정레벨(-80dBm)에서 여유가 많이 없었다. 입력광의 전력이 충분하다면 해상도를 더 높여 측정할 수 있다.

평면도파로 구조는 일정하게 두고 평면도파로와 광

섬유의 간격(g)을 연마로 바꾸어 가면서 광 여파특성을 측정하여 그림 3(a), (b), (c), 제시하였다.

는 8.5dB, (b)는 13.5dB, (c)는 19.5dB의 손실을 각각 보였고, 이로부터 계산된 g 는 $4.1\mu\text{m}$, $3.7\mu\text{m}$, $3.2\mu\text{m}$ 이다.

그림 3으로부터 간격 g 가 감소함에 따라 소멸비가 증대됨을 알 수 있다. 이 효과는 평면도파로와 광섬유가 근접할수록 광 결합이 커지기 때문에 일어나는 것이다. 그러나 g 의 변화에도 불구하고 2개의 중심파장은 고정되어 있음을 알 수 있다. 측면 연마된 광섬유와 평면도파로를 결합하기 전의 출력(reference)과 후의 출력(unpolarization)을 비교하는 방법으로 삽입손실은 구한 결과 제작된 소자들의 삽입손실은 0.5dB 이하로 나타났다. 여기서 사용된 폴리머 도파로는 도금용으로 주로 이용되는 AZ4562 양성 포토레지스터이다. 스핀코팅으로 제작된 폴리머 도파로의 두께는 α -step으로 측정된 결과 $9.1\mu\text{m}$ 였으며, 광섬유의 유효굴절률은 1.4460으로 놓고 식(3)을 이용한 이론적 예측치($9.27\mu\text{m}$)와 거의 일치하였다.

다음은 광통신 파장에서 20dB 이상의 소멸비를 가지도록 광섬유 블록을 적절히 연마한 뒤 포토레지스터, 자외선 경화 에폭시 등의 굴절률이 다른 폴리머 평면도파로를 결합시켜 광 여파 특성을 비교하였다.

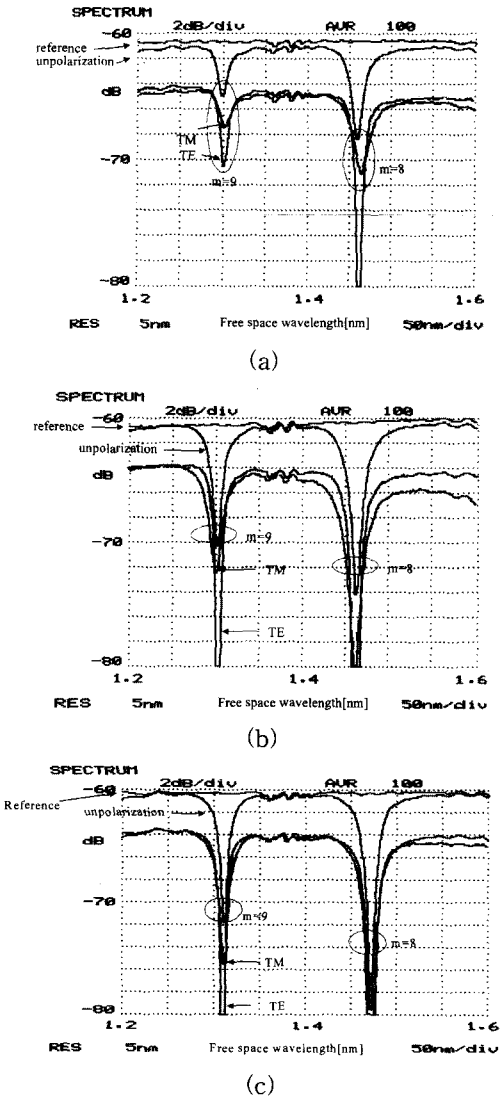
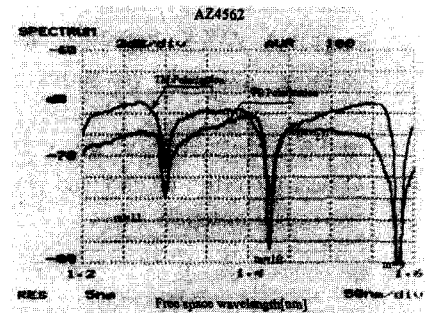


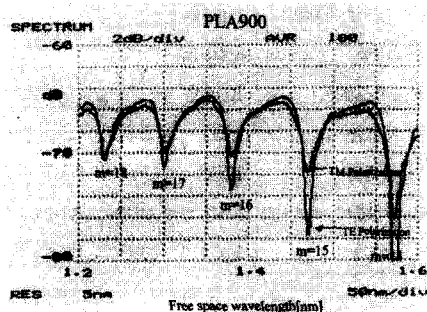
그림 3. 연마단계에 따른 광 여파 특성비교

Fig. 3. Comparison of optical filtering characteristics with polishing steps. (a) $g=4.1\mu\text{m}$, (b) $g=3.7\mu\text{m}$, (c) $g=3.2\mu\text{m}$.

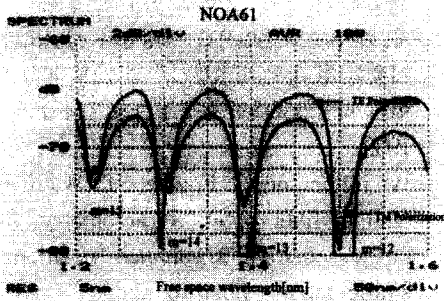
간격(g)는 Liquid drop 방법^[13] 즉, 연마된 광섬유 위에 굴절률 정합액을 떨어뜨린 후 광섬유 입출력 사이에 발생하는 광손실로부터 계산하는 방법을 이용하여 구할 수 있다. 손실측정에 광원으로 파장이 1.3 μm 인 레이저 다이오드가 사용되었고 굴절률 정합액으로 싸이클로헥사놀(cyclohexanol)이 사용되었으며 45°C에서 가장 큰 손실이 발생하였다. 이때 그림 3(a)



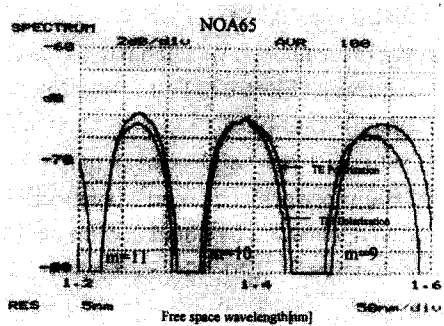
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 제작된 소자의 여파특성 비교, (a)AZ4562 (n=1.595), (b)PLA900 (n=1.587), (c)NOA61 (n=1.537), (d) NOA65(n=1.505)

Fig. 4. Comparison of the optical filtering properties of fabricated devices, (a)AZ4562 (n=1.597), (b)PLA900 (n=1.587), (c)NOA61 (n=1.537), (d) NOA65(n=1.505).

그림 4에서 알 수 있듯이 평면도파로 코어의 굴절률이 높을수록 파장선택성이 높아지는 현상은 앞서 II장에서 언급한 동작특성과 일치하였다. 그리고 평면도파로 코어의 굴절률이 낮을수록 광섬유모드와 평면도파로 모드사이의 결합이 크게 일어나는 현상도 관측된다. 이 효과는 평면도파로의 코어층과 클래딩의 굴절률 차이가 작을수록 광섬유모드와 광전력이 많이 중첩되기 때문에 결합모드 이론에서 결합계수가 커지는 효과와 같다. 그림 4에서 TM편광이 더 짧은 중심파장을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 그 차이는 평면도파로 물질에 따라 다소 다르게 나타났다. 식(1)에 의하면 TE와 TM편광의 중심파장의 차이는 대체로 3nm 이하로 계산되었다. 굴절률이 높은 평면도파로 물질에서는 편광상태에 따른 중심파장의 차이가 구별할 수 없을 정도로 작았다. 이 결과는 도파물질이 등방성이고 평면도파로의 상부 클래딩이 광섬유 클래딩

과 같은 대칭적 도파로 구조에서 위상정합시 평면도파로의 상하부 계면에서 발생하는 위상천이가 매우 작기 때문이다. 기존의 연구결과에서는 평면도파로 물질의 비 대칭성과 도파물질의 복굴절성 때문에 편광상태에 따라 중심파장의 차이가 수십 nm 정도로 나타났다^[8, 9, 10]. 한편 각 소자의 중심파장이 짧을수록 소멸비가 줄어드는 현상은 모든 소자에서 관측된다. 이 효과는 광섬유 내에서 파장이 짧을수록 광이 더 코어쪽에 많이 분포하기 때문이다. 중심파장에서의 소멸비는 TE편광이 약간 더 크게 나타났다.

실험 결과 광섬유와 평면도파로의 간격으로 중심파장에서 여과깊이를 필요하다면 조절이 가능하고, 중심파장의 위치는 평면도파로의 두께만을 고려하면 된다. 그리고 파장선택도, 즉 대역폭은 평면도파로의 굴절률에 의해 결정된다. 기능과 목적에 따라 여러 가지 물질들이 평면도파로의 재료가 될 수 있다. 최근에는 굴절률이 1.65이상이면서 열적으로 매우 안정된 폴리머 물질이 상용화되어 광도파로에 이용되고 있으며^[14] 평면도파로의 재료선택이 원하는 광학적 특성을 얻는데 무엇보다 중요하다.

V. 결론

측면 연마된 단일모드 광섬유와 평면도파로를 독립적으로 제작한 후 물리적 압력으로 광결합을 시켜 동작특성을 분석하였다. 이는 하나의 광섬유 블록으로 여러 개의 샘플에 반복적으로 사용할 수 있기 때문에 원하는 소자개발에 있어 실험 시간과 과정을 절약할 수 있다. 제안된 실험방법으로 굴절률이 다른 여러 가지 폴리머를 평면도파로의 재료로 이용한 광섬유-광결합기의 동작특성을 소자 제작과정에서 실시간으로 측정하였다. 이러한 결합기는 0.5dB이하의 낮은 광손실을 가졌고, 대칭형 평면도파로 구조를 도입함으로써 편광의존성이 매우 작은 응답특성을 얻었다. 기능과 목적에 따라 여러 가지 물질이 평면도파로의 재료가 될 수 있을 것으로 보인다. 본 논문의 연구 결과로 볼 때 단일모드 광섬유와 매우 높은 분산특성을 가지는 평면도파로간의 소산장 결합을 이용한 광결합기를 수동소자의 형태로는 EDFA의 이득평탄화를 위한 대역제거 광필터로 그리고 능동소자로의 형태로는 가변 광감쇄기, 파장가변 광필터, 광센서 등으로 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A. E. White, "Production of in fiber gratings using a diffractive optical element," *Electron Lett.*, Vol. 29, No. 6, pp.566-568, March, 1993.
- [2] A. M. Vengsarka, P. J. lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, J. E. Soie and T. Erdongan, "Long-period fiber gratings as Band rejection filters," *IEEE J. Lightwave Technog.*, Vol. 14, No. 1, pp. 58-65, January, 1996.
- [3] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, R. G. Lamont "Biconnical-taper single-mode fiber coupler," *Optics Lett.*, Vol. 6, No. 7, pp.327-328, 1981.
- [4] B. A. Ferguson and C. L. Chen, "polarization controller based on a fiber-recirculating delay line," *Appl. Opt.* Vol. 30 No. 36, pp 7597-7604, 1994.
- [5] C. Millar, M. Brierey, and S. Mallinson, "Exposed-core single-mode fiber channel-dropping filter using a high-index overlay waveguide," *Opt. Lett.*, Vol. 12, No. 4, pp. 284-286, 1987.
- [6] D. Marcuse, "Investigation of coupling between a fiber and an infinite slab," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 7 pp.122-130, January, 1989.
- [7] Krassimir P. Panajotov and Andrej Tz. Andrew, "Distributed coupling between a single-mode fiber and a planar waveguide," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 11, No. 5, pp. 826-834, May, 1994
- [8] S. A. Hanilton, D. R. Yankelevich, A. Knoesen, R. T. Weverka, R. A. Hill, and G. C. Bjorkund, "Polymer in-line fiber modulators for broadband radio-frequency optical links," *J. Opt. Soc. Am. B*. Vol. 15, No. 2, February, 1998.
- [9] S. Creaney, W. Johnstone, and K. McCallion, " Continuous-fiber modulator with high-bandwidth coplanar strip electrodes," *IEEE Photonics Tech. Lett.* Vol. 8, No. 3, pp. 355-357, March, 1996.
- [10] 유호종, 김광택, 김성국, 이소영, 송재원, 김시홍, 강신원, "단일모드 광섬유와 평면도파로를 이용한 열 광학 광결합기," 제 14회 파동 및 레이저 학술발표대회 논문집, pp. 114-115, 2월, 1999
- [11] W. Johnstone, G. Fawcett, L. W. K. Yim, "Inline fiber-optic refractometry using index-sensitive resonance positions in single-mode fiber-to-planar polymer-waveguide couplers," *IEE, Proc. - Optoelectron.*, Vol. 141, No. 5, pp.229-302, October, 1994.
- [12] K. Mccallion, W. Johnstone and G. Thursby, *Electron. Lett.*, Vol. 28, No. 4 pp.410-411, 1992.
- [13] Ssu-pin ma and Shiao-min Tseng, "High-performance side-polished fiber and application as liquid crystal clad fiber polarizers," *IEEE J. Lightwave Tech.* Vol. 15, No. 4, pp.864-867, August, 1995.
- [14] M. C. Oh, H. J. Lee, M. H. Lee, J. H. Ahn, S. G. Han, and H. G. Kim " Tunable wavelength filters with bragg gratings in polymer waveguides," *Applied Phys. Lett.*, Vol. 73, No. 18, pp. 2543-2545, November, 1998.

저 자 소 개



金光鏢(正會員)

1989년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사). 1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1991년 3월 ~ 1995년 5월 포항 방사광 가속기 연구소 1994년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 박사과정



金時弘(正會員)

1997년 2월 경일대학교 전자공학과 (공학사). 1998년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 석사과정



劉虎種(正會員)

1997년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사). 1997년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 석사과정



姜信元(正會員)

1978년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사). 1980년 2월 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1983년 ~ 1988년 (주)국제 컴퓨터 엔지니어링. 1989년 4월 ~ 1993년 7월 일본 게이오 대학원(공학박사).

1994년 3월 ~ 현재 경북대학교 센서공학과 조교수



宋在元(正會員)

1978년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사). 1980년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1984년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 1984년 8월 ~ 현재 경북대학교 전기전자공학부

교수