

論文99-36D-9-8

측면 연마된 광섬유와 굴절률 정합액사이의 광결합을 이용한 가변 광 감쇠기

(Variable Optical Attenuator using Optical Coupling between a Side Polished Fiber and Refractive Index Matching Liquid)

金光鐸*, 宋在元*

(Kwang Taek Kim and Jae Won Song)

요 약

단일모드 광섬유의 한쪽 측면을 코어 가까이 연마한 광섬유와 그 위에 덮혀진 정합액 사이의 광결합을 이용한 가변 광 감쇠기를 제안하였다. 광섬유모드와 방사모드사이의 결합으로 인하여 정합액의 미세한 굴절률 변화는 큰 광손실의 변화를 발생시킨다. 정합액의 열광학 효과를 이용하여 광손실을 제어하였다. 실리콘 V홈을 이용하여 측면 연마된 광섬유 블록(block)을 제작하였다. 실험결과 5℃ 정도의 온도변화로써 감쇠량을 최대와 최소사이에서 제어 할 수 있었다. 제작된 소자의 편광의존성 손실은 0.5dB이었고, 삽입손실은 0.2dB 이었다.

Abstract

In this paper we proposed a variable optical attenuator using the side polished fiber coupled with a refractive index matching liquid. Small variation of refractive index of matching liquid can induce very large change of optical loss due to the coupling between the fiber mode and radiation mode. The thermo-optic effect of matching liquid was used to control the optical attenuation. The side polished fiber block was fabricated using the silicon V groove. Experimental results showed that 5℃ temperature variation was enough to adjust full range attenuation. The polarization dependent loss and insertion loss of the fabricated devices were 0.5dB and 0.2dB respectively.

Key words: variable optical attenuator, side polished fiber, index matching liquid, thermo-optic effect.

1. 서 론

가변 광 감쇠기(variable optical attenuator)는 광섬유 증폭기(EDFA)의 적절한 이득을 얻기 위한 입력광의 강도 조절이나, WDM 네트워크상의 각 채널별 광전

력을 균일하게 유지하기 위한 목적으로 많이 이용된다. 지금까지 여러 형태의 미세전자기계 시스템(MEMS: microelectromechanical system) 액츄에이터를 이용하는 방법^{[1][2][3]}, 집적광학 도파로를 이용하는 방법이 활발하게 연구되어 왔다^[4]. 일반적으로 요구되는 가변 광 감쇠기의 특성으로는 삽입손실이 작고, 넓은 강도조절 범위를 가져야 하며, 편광에 독립적으로 동작하며 파장에 민감하지 않아야 한다. 그리고 소자 크기가 작아야 다른 광소자와 집적화가 용이하다.

본 논문에서는 일반적으로 요구되는 특성을 만족하

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electrical and Electronic Engineering, Kyungpook National University)

接受日字: 1999年5月31日, 수정완료일: 1999年7월13일

는 가변 광 감쇠기를 구현하는 방법으로 측면 연마된 광섬유와 굴절률 정합액 사이의 광학적 결합을 이용한 가변 광 감쇠기를 제안하고 이론과 실험으로 가능성을 검증하였다. 제안된 방법은 광섬유를 절단하지 않고 광 감쇠량을 조절할 수 있기 때문에 삽입손실이 작고 또한 소자의 크기도 작게 만들 수 있다. 측면이 코어 가까이 연마된 광섬유 위에 광섬유보다 높은 굴절률을 가지는 정합액이 놓이면 광섬유 모드와 방사모드 사이에 광 결합이 발생하게 된다. 이러한 현상으로 인하여 광섬유 모드의 손실이 발생하며 광섬유 위에 도포된 물질, 즉 정합액의 굴절률에 따라서 민감하게 광손실이 변할 수 있다^{[5][6]}. 기존의 연구결과에 의하면 광섬유위에 도포된 용액(정합액)의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률과 코어굴절률 사이에서 변할 때 광섬유의 손실이 가장 민감하게 변하게 된다. 이러한 특성을 이용하여 정합액의 굴절률을 제어하면 광섬유 상에서 광의 강도를 변조시킬 수 있다. 이러한 소자는 이론적으로 편광에 독립적으로 동작한다. 본 논문에서는 굴절률을 제어하는 방법으로 열 광학 효과를 이용하였다. 정합액의 광학적 특성은 굴절률이 광섬유의 유효굴절률 보다 약간 커야 하며 우수한 열 광학 효과를 가져야 한다.

측면 연마된 광섬유를 제작하는 방법으로 <100>실리콘 위에 이방성 식각 기술로 제작된 V홈에 광섬유를 접착제로 고정시킨 후 연마하는 방법을 이용하였다. 제작된 측면 연마된 광섬유블록 위에 정합액을 도포하고 열을 인가하여 광의 강도 변조를 측정하였다. 또한 제작된 소자에 입사되는 광의 파장과 편광상태 따른 동작 특성을 관측하였다.

II. 이 론

그림 1과 같이 한쪽 측면이 코어 가까이 연마된 광

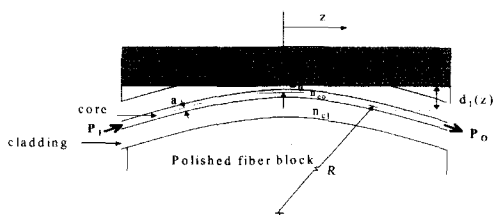


그림 1. 측면 연마된 단일모드 광섬유를 이용한 가변 광변조기의 구조

Fig. 1. Structure of a variable optical attenuator using a single mode side polished fiber.

섬유 위에 정합액을 도포하면 광섬유와 정합액사이 에 소산장(evanescent field) 결합이 발생한다.

여기서 정합액의 두께는 무한대로 가정하고 정합액의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 작을 경우 광섬유는 손실 없이 광섬유 내에서 잘 간혀서 진행하지만 반대로 정합액의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 크다면 광섬유 모드는 방사모드(radiation mode)와 결합하게 되어 광의 손실을 가져오게 된다. 이러한 구조에서 곡률 반경(R)이 충분히 크다면 $d_1(z)=d_0+z/2R$ 가정 할 수 있고 이때 입출력사이의 광 손실은 다음과 같이 주어진다^[6].

$$a_0 = 10 \log(P_{II}/P_0) = (10 \log_{10}) \sqrt{(\pi Ra)} \frac{4\beta_0}{n_c k_0^2} \left[\frac{\mu}{aVK_1^2(\omega)} \right]^2 \frac{V_{ex} - \omega}{V_{ex}^2} \int_0^1 \frac{\sqrt{1-\xi}}{[(V_{ex} - \omega)\xi^2 + \omega^2]^{1/4}} \exp[-2(\frac{d_0}{a}) \cdot \sqrt{(V_{ex} - \omega)\xi^2 + \omega^2}] d\xi \quad (1)$$

그림 1과 같은 소자구조에서 광섬유 모드의 손실은 소자구조, 즉 광섬유의 곡률반경(R)과 연마깊이(d₀)에 매우 의존한다.

여기서 a는 광섬유 코어의 반경, K₁는 2종 1차 수경 Bessel 함수, k₀는 자유공간 전파상수를 각각 의미한다. 그리고 μ와 ω는 정규화된 광섬유 코어와 클래딩의 횡방향 전파상수이며 V_{ex}는 정합액의 정규화 주파수로서 다음과 같은 표현식을 가진다

$$\begin{aligned} \mu &= a\sqrt{k_{co}^2 - \beta} \\ \omega &= k_0 a \sqrt{\beta^2 - k_{cl}^2} \\ V_{ex} &= k_0 a \sqrt{n_x^2 - n_{cl}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 k_{co} = n_{co}k₀, k_{cl} = n_{cl}k₀로 주어지고 k_{cl} < β < k_{co} 관계에 있다. β₀는 연마하기전 광섬유 기본모드(LP₀₁ mode)의 전파상수로서 광섬유의 고유치 방정식을 이용하면 쉽게 구할 수 있다^[7].

$$\frac{\mu J_1(\mu)}{J_0(\mu)} = \frac{\omega K_1(\omega)}{K_0(\omega)} \quad (3)$$

본 논문에서는 광섬유의 코어반경(a)는 4.1 μm, R=15cm, 코어의 굴절률은 1.4485, 클래딩의 굴절률은 1.4440로 설정하고 식(1)~(3)을 이용하여 정합액의 굴절률(n_{ex})에 따른 광 손실을 계산하여 그림2에 제시하였다. 여기서 광섬유의 유효굴절률(n_f)=β/k₀이다.

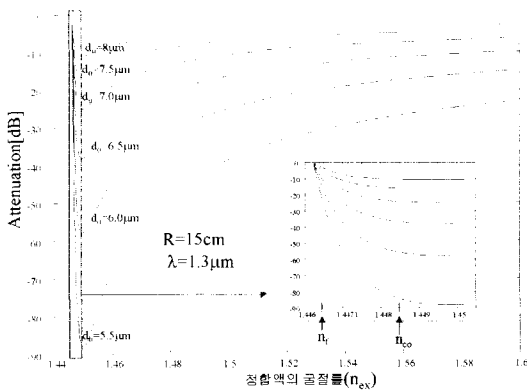


그림 2. 정합액의 굴절률에 따른 광 감쇠량; 이론적 결과

Fig. 2. Optical attenuation as a function of refractive index of matching liquid.

그림 2에서 $n_{ex} < n_f$ (광섬유의 유효굴절률) 일 때는 광손실은 거의 발생하지 않으며, 정합액의 굴절률과 광섬유의 코어 굴절률이 일치할 때 가장 큰 손실이 발생한다. 정합액으로 빠져나가는 방사모드(radiation mode)와 광섬유 모드의 위상정합 조건을 만족할 때 가장 효과적인 결합이 발생하기 때문이다. 정합액의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률과 코어굴절률 사이에서 변할 때 가장 민감하게 출력광의 강도가 변조됨을 의미한다. 그리고 연마깊이가 깊어수록 광손실은 지수함수적으로 커지며 원하는 최대소멸비를 d_0 값으로 조절할 수 있다. 본 연구에서 정합액으로 사용한 사이클로헥사놀(cyclohexanol)이나, 혹은 cagille index oil의 열광학계수는 -4×10^{-4} 정도로서^{[7][8]}, 5~6°C 사이의 온도변화로써 전 범위에 걸쳐 광 감쇠를 조절할 수 있을 것으로 보인다.

이러한 소자의 동작특성이 광섬유에 입력되는 광의 편광상태와 무관한 것으로 이론적으로는 알려져 있다. 그 이유는 비록 연마된 광섬유 경계면에서 TE와 TM 편광된 빛은 다른 경계조건을 가지지만 광섬유 모드와 정합액으로 빠져나가는 방사모드(radiation mode)사이의 결합계수는 편광에 따라 거의 달라지지 않기 때문이다. 그리고 파장이 길수록 광 결합이 크게 일어나기 때문에 손실이 더 증가한다.

III. 소자 설계 및 제작

앞서 그림 1과 같은 소자를 제작하기 위해서는 광섬

유의 한쪽 측면을 코어 가까이 연마하는 공정이 필요하다. 광섬유는 그 두께가 너무 작아서 광섬유만으로 연마가 쉽지 않기 때문에 광섬유를 지지하기 위한 블록(block)이 필요하다. 연마를 위한 광섬유 지지대로 실리콘 V홈을 이용하는 방법과 퀴츠(Quartz)를 이용하는 방법이 잘 알려져 있다^[7]. 본 논문에서는 전자의 방법을 이용하였다. 실리콘 기판상의 V홈의 형상을 예측하여 연마깊이(d_0)와 광섬유의 곡률반경(R)을 설계하였다. 그림 3는 설계된 소자의 정면, 윗면 그리고 측면에서 본 개략적 구조이다. 그림 3에서 광섬유 클래딩의 반경 $b = 62.5 \mu\text{m}$, 두 <111>면 사이각은 70.52° 이다. W와 식 각깊이 (d_0)와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$d_0 = \frac{w}{2} \cot \frac{\theta}{2} - b \cdot \csc \theta / 2 \quad (4)$$

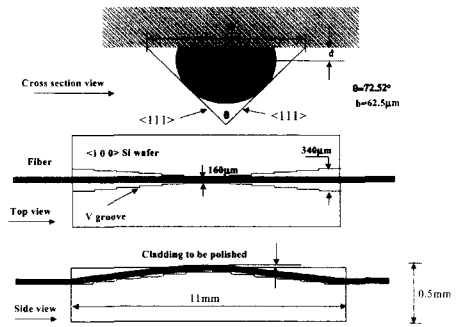


그림 3. 측면 연마된 광섬유 블록의 구조
Fig. 3. Structure of a side polished fiber block.

식(4)를 이용하여 V홈 패턴을 설계하였으며 포토리소그라피 공정을 위하여 emulsion 마스크를 제작하였다. 두께가 0.5mm인 <100>실리콘 기판을 1050°C 에서 2시간 습식산화시켜 약 8000\AA 정도의 산화막을 형성하였다. 산화막이 실리콘 식각시 보호막으로 작용하며 충분히 두꺼워야 한다. 포토리소그라피 공정으로 실리콘 산화막위에 V홈 패턴을 형성한다. 즉 V홈이 형성될 부분만 산화막이 제거되는 형태를 지니게 된다. 산화막은 6:1 BHF에 20°C 에서 16분 정도 담구면 제거된다. 83°C 의 KOH(44g)+H₂O(100g) 용액에 약 3시간 동안 실리콘을 이방성 식각하여 V홈을 완성하였다. 단일 모드광섬유를 약 1m 정도 자르고 중간부위에 피복을 1.5cm 제거한 후 실리콘 V홈에 삽입한다. 에폭시 접착제(CIVA

사, Aradite)로 광섬유를 실리콘 V홈위에 밀착시켜 고정하고 에폭시 접착제가 완전히 경화될 때까지 유지한다. 12 μm 연마필름으로 광섬유를 연마하였다. 단순히 광섬유 클래딩이 코어가까이 제거되었는지 확인하기 위하여 파장 633nm인 HeNe레이저광을 한쪽 광섬유에 입사시켜 연마된 부위에서 산란광이 나타나는지 연마 중간에 관찰하였다. 산란광이 보이기 시작하면 3, 1, 0.1 μm 연마필름(태평양 연마)으로 광섬유 표면을 마무리한다. 연마깊이(d)는 정합액을 도포후 발생하는 최대손실을 측정하여 구하였다.

VI. 동작특성 측정 및 분석

연마된 광섬유 위에 굴절률이 다른 물질들을 코팅하여 동작특성을 실험하였다. 연마된 광섬유 블록은 25 $^{\circ}\text{C}$ 까지 기계적 변형이 발생하지 않았다. 용액의 굴절률은 아베굴절계(ATAGO, NAR-1T)로 측정하였고 폴리머의 굴절률은 프리즘 결합장치(MERERICON, PC-2010)를 이용하여 측정하여 표1.에 제시하였다. 표 1에 제시된 굴절률은 파장0.633 μm 에서 측정한 값이며 광통신 적외선 파장에선 분산에 의하여 약간 줄어드는 값을 가질 것으로 예상된다. 사이클로헥사놀을 제외한 다른 용액은 비휘발성으로서 100 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서도 소모되지 않았다.

표 1. 실험에 사용된 물질의 굴절률
Table 1. Refractive index of materials used for the experiment.

| 물질 | 굴절률 | 형태 | 제조사 |
|--------------|------------------|-----|------------|
| cargille oil | 1.440~1.456(5가지) | 용액 | cargille |
| 사이클로헥사놀 | 1.465 | 용액 | aldrich |
| 식용유 | 1.4727 | 용액 | 제일제당 |
| 엔진유 | 1.4735 | 용액 | 쌍용 |
| 모빌유 | 1.4775 | 용액 | |
| UV15 | 1.4877 | 용액 | Masterbond |
| NOA65 | 1.4984 | 용액 | Noland |
| 정합유 | 1.5021 | 용액 | Anritsu |
| NOA61 | 1.5294 | 용액 | Noland |
| AZ4562 | 1.60 | 폴리머 | Hoechst |

제작된 소자의 동작특성을 측정하기 위한 장치도는 그림 4와 같다. 우선 정합액의 굴절률에 따른 손실특성

을 측정하기 위하여 파장 1.3 μm 레이저 다이오드를 소자의 입력 광원으로 사용하였고 광 전력계로 광섬유 출력광의 강도를 측정하였다. 그리고 제작된 소자의 편광과 파장에 대한 의존성을 측정하기 위하여 백색광원의 출력을 글렌-톰슨 편광기로 광섬유의 연마된 면에 수직 혹은 수평 편광시켜 소자에 입사하고 광 스펙트럼 분석기로 출력광을 검출하였다. 백색광원의 출력은 파장 1.2~1.6 μm 까지 -58~-59dBm이었고 광 스펙트럼 분석기의 최소측정 레벨은 -80Bm 이었다. 실험에 사용된 광원과 광검출 장비는 Anritsu사의 제품이다.

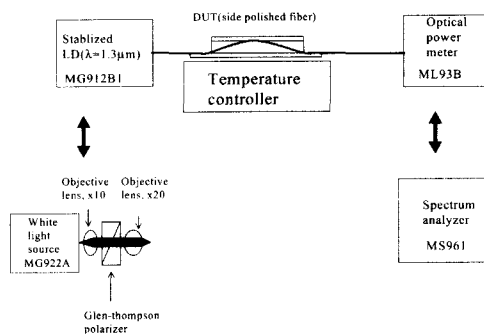


그림 4. 제작된 소자의 특성을 측정하기 위한 장치도
Fig. 4. Optical setup for the measurement of the properties of fabricated devices.

그림 5는 연마깊이(d0)가 다른 세 개의 샘플에 정합액의 굴절률에 따른 손실을 측정한 결과이다. 연마된 광섬유위에 도포한 물질을 교체할 때 메탄올로 깨끗하게 용액을 세척하는 과정이 특성을 정확하게 측정하기 위해서 중요하다. 그림 5에서 광섬유위에 도포된 정합액의 굴절률은 파장 0.633 μm 에서 측정한 값이기 때문에 분산을 고려하면 파장이 1.3 μm 에서는 굴절률이 약간 줄어든다. 여기서 d0는 제작된 소자의 최대손실로부터 계산된 값이다. 실제로 이러한 방식으로 측면 연마된 광섬유를 이용한 소자 제작시 d0를 구하는 방법을 많이 이용하고 있다^[7]. 이론적 예측과 마찬가지로 광섬유의 유효굴절률 부근에서 광의 손실이 아주 민감하게 변하는 특성을 보여주고 있다. 파장 0.633 μm 에서 측정한 굴절률이 1.461일 때 가장 큰 손실을 보였다. 즉 사이클로헥사놀의 온도가 45 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 가장 큰 감쇠량을 보였다. 같은 길이의 연마하지 않은 광섬유와 손실을 비교하는 방법으로 삽입손실을 측정된 결과 0.2dB 이하였다.

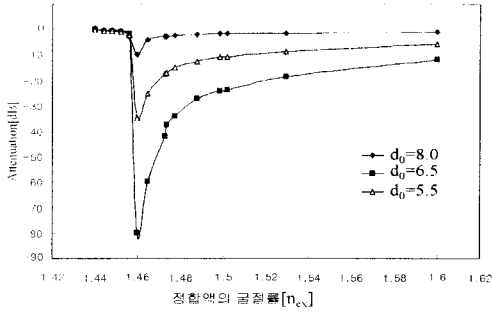


그림 5. 정합액의 굴절률에 따른 광손실의 변화; 실험 결과

Fig. 5. Refractive index of matching liquid vs. optical attenuation; experimental results.

한편 정합액의 열광학 효과를 이용한 가변 광감쇠 현상을 관측하였다. d_0 가 $6.5\mu\text{m}$ 인 광섬유 블록위에 사이클로헥사놀($n = 1.465$), 자동차용 엔진유 oil($n = 1.473$), 그리고 Anritsu사의 매칭 유($n=1.502$)를 도포하여 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 정확도를 가진 온도제어기로 열을 인가하여 감쇠 특성을 측정하였다. 용액의 열광학 효과에 의하여 굴절률이 감소하며 광섬유의 유효굴절률 부근에서 매우 민감하게 출력광의 강도가 변조된다. 실제로 적절한 감쇠량을 제어하는데 필요한 온도변화는 대체로 5°C 정도면 충분할 것으로 보인다. 그림6의 결과를 이용하여 계산한 사이클로헥사놀의 열광학 계수는 $-4.16 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 이므로 실제값($-4.10 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$)과 잘 일치하였다. 여기서 광섬유의 온도변화에 의한 굴절률변화는 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 이므로 정합액의 열광학효과에 비해 매우 작기 때문에 [9] 고려하지 않았다. 그리고 굴절률이 높은 물질일수록 급격한 감쇠량의 변화를 발생시키는 온도가 높다는 사실도 그림6에서 보여주고 있다. 그림6의 결과에 의하면 측면 연마된 광섬유를 온도센서나 굴절계로서 활용할 수 있을 것으로 보인다.

d_0 가 $8.0\mu\text{m}$ 인 측면 연마된 광섬유 블록을 이용하여 광 손실의 파장과 편광에 대한 의존성을 측정하였다. 정합액으로 사이클로헥사놀을 이용하였다. 그림 7에서 정합액을 도포하기전의 파장응답이 기준치이다. 파장이 길수록 직선적으로 손실이 증가하는 경향을 그림 7에서 보여주고 있다. 이는 파장이 길수록 광섬유 모드의 소산장이 더 넓게 분포하기 때문에 방사모드로 결합이 크게 일어나기 때문으로 분석된다. 그리고 그림 7(a)와 (b)를 비교하면 편광의존성 손실을 찾을 수 있다. 여기서 편광의존성 손실(polarization dependent loss)이란 연마된 면에 수직 편광과 수평 편광이 경험하는 감쇠량의 차이를 의미한다. 23°C 와 43°C 에서 손실을 측정한

결과 파장과 손실의 크기에 따라 다소 다르지만 최대 0.5dB 의 편광의존성 손실을 보였다.

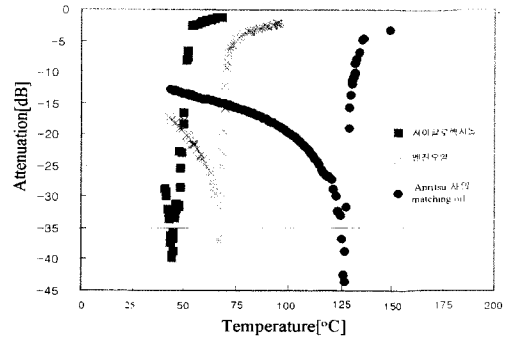


그림 6. 온도변화에 의한 광감쇠량 변화

Fig. 6. Variation of optical attenuation due to change of temperature.

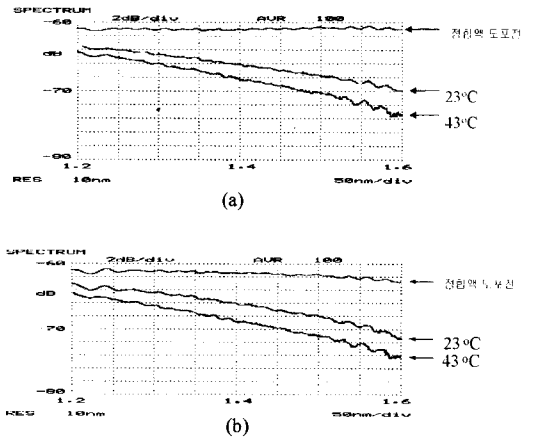


그림 7. (a) TE편광된 입력의 파장응답, (b) TM 편광된 입력의 파장응답

Fig. 7 (a) Wavelength response of TE polarized input, (b) Wavelength response of TM polarized input.

V. 결론

단일모드 광섬유의 클래딩을 연마하여 코어 가까이 제거한 후 굴절률이 광섬유와 비슷한 정합액을 도포한 가변 광감쇠기를 제안하였다. 다양한 굴절률을 가진 용액을 도포하여 광손실 특성을 측정한 결과 이론적 예측과 마찬가지로 정합액의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률 부근에서 변할 때 측면 연마된 광섬유의 출력광의 강도가 민감하게 조절되었다. 광섬유의 유효굴절률보다 더 큰 굴절률을 가진 물질을 도포한 후 열을 인

가하여 광 변조특성을 측정하였다. 적절한 감쇠를 조절 하는데 필요한 온도변화는 5°C 정도였다. 그리고 굴절률이 높은 물질일수록 광변조를 일으키는 온도가 더 높은 결과를 보였다. 이러한 특성은 이론적 예측과 잘 일치하는 것이다. 제작된 소자의 편광의존성 손실은 0.5dB 이하였고 파장이 길수록 더 큰 광손실을 보였다. 본 연구의 실험결과를 볼 때 측면 연마된 광섬유를 온도센서나, 굴절계, 빠른 속도가 요구되지 않는 광 스위칭 소자 등, 여러 가지로 응용 할 수 있을 것으로 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Barber, C. R. Giles, V. Askyuk, R. Ruel L. Stulz, and D. Bishop, "A fiber connectorized MEMS variable optical attenuator," *IEEE, Photonics Tech Lett.*, Vol. 10, No. 9, pp1262-1264, september, 1998.
- [2] Cornel Marxer, Patrick Griss, and Nicolaas F. de Rooij, "A variable optical attenuator based on silicon micromechanics," *IEEE, Photonics Tech Lett.*, Vol. 11, No. 2, pp233-235, february, 1999.
- [3] Han-Young Lee, Hyung-Do-Yoon, young-Min Im, John Love, and Dae-Woo Yoon, "A miniaturised Variable optical attenuator utilising single-mode offset core fibre." *J. Electrical Engineering and Information Science*, Vol. 4, No. 2, pp209-213.
- [4] 이상신, 진용성, 손용성, "비대칭 분기형 폴리머 광도파로를 이용한 가변 광 감쇠기," *제 6회 광 전자공학 학술회의 논문집*, 광주과학기술원, pp163-164, 1999. 5월
- [5] Ottakar G. Leminger and Remigiuz Zengerle, "Determination of single-mode fiber coupler design parameter from loss measurements," *IEEE J. Lightwave Tech.* Vol. LT-3, No. 4, pp.864-867, August, 1985.
- [6] 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, 1985.
- [7] Krasimir P. Panajotov and Andrej Tz. Andreev, "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] Shiao-Min Tseng and Chin-Lin Chen, "Side-polished fibers," *Applied Optics.* Vol. 31, No. 18. pp.3438-3447, June, 1992.
- [9] T. Izawa and S. Sudo, *Optical Fibers : Materials and Fabrications*, KTK Scientific Publishers Tokyo, p.45, 1986.

저 자 소 개



金光鐸(正會員)

1989년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(석사). 1991년 3월~1995년 12월 포항고속기 연구소 근무. 1994년 2월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정



宋在元(正會員)

1980년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1982년 2월 한국고학기술원 전기전자공학과(석사). 1986년 8월 한국과학기술원 전지전자공학과(박사). 1986년 9월~현재 경북대학교 전자전기공학부 교수