

논문 2004-41SD-2-5

측면 연마된 편광유지 광섬유와 폴리머 평면도파로 사이의 소산장 결합을 이용한 열 광학 가변 필터

(Thermo-Optically Tunable Filter Using Evanescent Field Coupling Between
Side-Polished Polarization Maintaining Fiber and Polymer Planar Waveguide)

윤대성*, 김광택*

(Dae Sung Yoon and Kwang Taek Kim)

요약

측면 연마된 편광 유지 광섬유와 폴리머 평면도파로가 결합된 비대칭 방향성 결합기를 이용하여 가변 광필터를 구현하였다. 소자의 최상부층 위에 형성된 마이크로 스트립 히터에 의하여 유도된 폴리머 평면도파로의 열광학 효과는 결합기의 공진파장을 이동시킨다. 제작된 소자는 720 mW의 인가 전력으로 230 nm 이상의 넓은 가변 범위를 보였다.

Abstract

We have demonstrated a tunable filter based on an asymmetric directional coupler made of a side-polished polarization maintaining fiber coupled with a polymer planar waveguide. The thermo-optic effects of the polymer planar waveguide induced by a micro-strip heater placed on the top layer of the device leads to shift of resonance wavelength of the coupler. The fabricated device exhibited wide tunable range exceeding 230 nm with 720 mW of applied electrical power.

Keywords : tunable filter, coupler, side-polished polarization maintaining fiber, thermo-optic effect, polymer

I. 서론

측면 연마된 광섬유와 평면도파로가 결합된 소자는 비대칭적 방향성 결합기로 간주되며 매우 큰 파장 선택성과 편광 선택성을 가질 수 있다. 연마된 광섬유 클래딩위에 폴리머^[1], 반도체^[2], 크리스탈^[3], 액정크리스탈^[4], 랑미르-브로젯(Langmuir-Blodgett)^[5] 필름 등 다양한 물질을 평면도파로의 재료로 활용할 수 있다. 소자의 동작 특성은 평면도파로의 광학적 구조 변수와 밀접한 관계가 있다. 비대칭 결합기는 두 인접한 광도파로가 위상 정합 조건을 만족할 때 효과적인 광결합

이 발생한다. 광섬유와 평면도파로는 서로 다른 분산 특성을 가지기 때문에 특정한 파장에서 위상정합 조건이 발생한다. 위상정합 조건을 만족하는 파장을 공진 파장으로 정의한다. 공진파장을 가변 시키는 방법으로 평면도파로의 전기광학 효과^[6] 혹은 열광학 효과^[7]를 이용하는 방법이 잘 알려져 있다. 전기 광학효과는 고속응답을 요구하는 소자에 적합하지만 큰 굴절률의 변화를 유도하기 힘들다. 폴리머는 일반적으로 유리나 크리스탈 계열의 물질보다 열 광학 효과가 한 차수 높기 때문에 폴리머의 열광학 효과를 이용한 광소자들이 많이 연구 되어 왔다.^[8,9]

본 논문에서는 측면 연마 광섬유위에 열광학 효과가 우수한 폴리머 평면도파로가 결합된 비대칭 광결합기를 이용하여 파장 가변 범위가 매우 넓은 가변 필터를 연구하였다. 광섬유-평면도파로는 편광에 의존하는 특

* 정회원, 호남대학교 광전자공학과

(Department of Optoelectronics, Honam University)

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대학교 광소재부품센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

접수일자 : 2004년 1월 2일, 수정완료일 2004년 2월 19일

성이 있기 때문에 입력광의 편광 상태가 바뀌면 출력이 흔들린다. 일반 단일모드 광섬유 내에서 모드의 편광 상태는 구부림, 뒤틀림, 압력 등 여러 요인에 의하여 바뀔 수 있기 때문에 단일 모드 광섬유-평면도파로 결합기의 출력이 불안 해 질 수 있다. 이러한 문제는 단일모드 광섬유 대신에 편광 유지 광섬유를 사용하면 피할 수 있다. 편광 유지 광섬유는 두개의 복굴절축을 가지며 하나의 복굴절축의 방향이 평면도파로의 TE(Transverse electric) 편광 혹은 TM(Transverse magnetic) 편광과 일치시키는 공정이 요구된다.^[10] 본 논문에서는 편광 유지 광섬유로 판다(PANDA: polarization maintaining and absorption reducing fiber) 광섬유를 사용하였다. 소자의 구조 변수가 동작 특성이 미치는 영향을 분석하였으며 소자의 제작공정 및 실험결과를 상세하게 소개하였다.

II. 소자 구조 및 동작원리

편광유지 광섬유는 두 개의 서로 직교하는 복굴절축(birefringence axis)을 가지며, 빠른 축 (fast axis) 과 느린 축 (slow axis) 으로 구분한다. 그림 1에 제안된 측면연마 편광유지 광섬유를 이용한 광섬유-평면도파로 결합기의 구조가 제시되어 있다. 그림 2는 소자의 단면 구조를 보여 주고 있다. 여기서 느린 축, 혹은 빠른 축과 상부 평면도파로는 수평으로 정확하게 정렬된 것으로 간주한다. 만일 정교하게 정렬되지 않으면 공진 파장에서 높은 소멸비(공진 깊이)를 기대할 수 없다. 그림 2는 빠른 축이 평면도파로와 평행한 구조이다. PANDA 광섬유는 두개의 응력부여부(stress applying part)가 있지만 그림 2에서 소자의 중심부에서는 하나의 응력부여부가 연마로 제거된 상태로 나타나 있다. 판다 광섬유의 두 직교 모드, 즉 느린 편광 모드는 평면도파로의 TM 모드와 빠른 편광 모드는 평면도파로의 TE 모드와 결합 할 수 있다. 평면도파로층의 도파층(guiding layer)의 두께는 d_0 로 나타낸다. 버퍼층은 금속에 의한 광의 흡수를 방지하기 위한 역할을 한다. 소자구조를 다층 평면도파로로 간주하고 직교모드 이론^[11]으로 분석한 결과 버퍼층의 굴절률이 광섬유 클래딩과 같을 때 도파모드와 금속층과 결합이 발생하지 않기 위한 최소 두께는 3 μm 정도였다.

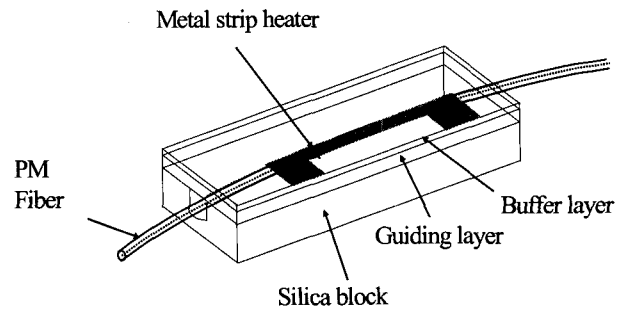


그림 1. 제안된 가변 필터의 구조
Fig. 1. Proposed structure of tunable filter.

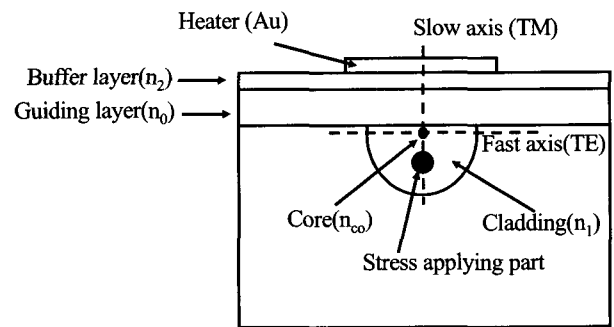


그림 2. 소자의 단면 모양
Fig. 2. Cross section view of the device.

비대칭 결합기는 특정한 파장에서 에너지 교환을 위한 위상 정합 조건을 만족하며, 이를 공진 파장으로 정의한다. 소자의 구조가 주어지면 광섬유와 평면도파로의 분산 곡선을 이용하여 공진 파장을 예측 할 수 있다. 버퍼층이 충분히 두꺼운 것으로 가정하면 평면 도파로의 고유치 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{2\pi d_0}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \psi_1 + \psi_2 \quad (1)$$

여기서 m 은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ 는 광의 파장, d_0 는 평면도파로의 코어층 두께, n_o 는 평면도파로의 코어 굴절률 n_{eo} 는 평면도파로의 m 번째 모드의 유효 굴절률이다. ψ_1 과 ψ_2 는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상치이로서 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 TE 편광에 대해서는 $\zeta=1$, TM 편광에 대해서는 $\zeta=n_o^2/n_i^2$ 을 대입하면 된다. n_i 는 평면도파로 상하부 클래딩의 굴절률

이다. 광섬유 모드와 평면도파로 모드 사이에 위상 정합 조건($n_{eo}=n_{ef}$)을 대입하면 공진 파장을 구할 수 있다. 여기서 n_{ef} 는 광섬유의 유효굴절률을 의미한다.

$$\lambda_m = \frac{2\pi d_0 (n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \phi_1 + \phi_2} \quad (3)$$

편광 유지 광섬유에서는 느린 모드(slow mode)와 빠른 모드(fast mode)에 대하여 각각 다른 유효굴절률을 대입해야 한다. 판다 광섬유의 경우 두 직교 편광의 유효굴절률차이 (modal birefringence)는 4×10^{-4} 정도 이다.

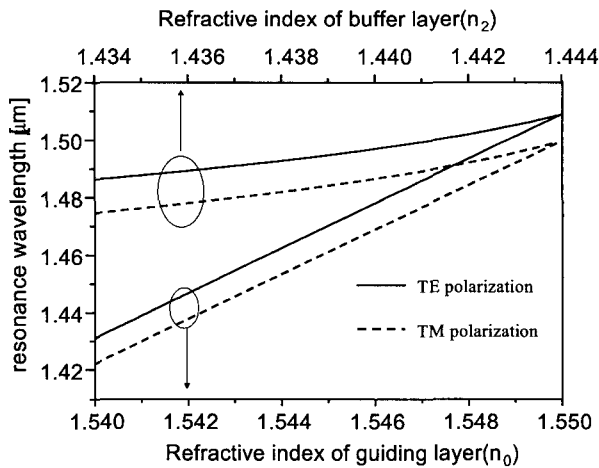


그림 3. 평면 도파로층의 굴절률에 따른 가변필터의 공진 파장(이론적 결과)
Fig. 3. Resonance wavelength verse refractive index of planar waveguide(theoretical results).

마이크로 스트립 히터에 전류를 인가하면 버퍼층과 도파층이 가열되고 열광학 효과에 의해 이들 물질의 굴절률이 변한다. 폴리머의 경우 온도가 올라가면 굴절률이 감소하기 때문에 식(3)에서 n_o 와 n_{ef} 가 감소하여 공진 파장은 단 파장으로 이동한다. n_o 를 1.55, 두께를 편의상 $5.5 \mu\text{m}$ 로 가정하고 버퍼의 굴절률(n_2)이 1.434에서 1.444로 변할 때 공진 파장의 변화와 버퍼의 굴절률을 1.444로 고정하고 도파층의 굴절률이 1.54와 1.55 사이에서 변할 때 공진 파장의 가변 특성이 그림 3에 제시되어 있다. 이때 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})은 느린 편광 모드에 대해서는 1.4460, 빠른 편광 모드에 대해서는 1.4456을 적용하였다. 도파층의 굴절률의 변화량과 공진 파장의 이동거리는 선형적인 관계를 가진다. 하지만 버퍼층의 굴절률이 광섬유 클래딩 부근에

서 변할 때 공진파장이 더 민감하게 움직이는 사실을 알 수 있다. 도파층의 굴절률 변화가 버퍼층의 굴절률 변화보다 4~5배 더 민감하게 공진 파장 변화를 유도함을 알 수 있다.

III. 실험 및 분석

편광유지 광섬유를 연마하기 위해 지지대로 실리카 블록(길이:25mm 폭:10mm, 높이:5mm)을 이용하였다. 실리카 블록은 광섬유와 동일한 재질이기에 연마 후 연마된 광섬유 클래딩 표면과 실리카 표면이 평탄하여 연마된 광섬유 클래딩 위에 균질한 평면도파로막을 형성시킬 수 있다. 실리카 블록위에 곡률반경은 25cm, 폭은 140 μm , 중앙부에서 깊이는 130 μm 인 홈을 다이아몬드 휠로 새긴다. 편광 유지 광섬유로 후지쿠라사의 1550 nm 파장용 판다 광섬유를 사용하였다. 판다 광섬유의 응력부여부의 그림자 영상을 획득하는 방법^[10]으로 빠른 축이 연마되는 면과 평행이 되도록 설정하였다. 그 후 실리카 블록의 홈 속에 판다 광섬유를 삽입하고 자외선 경화 에폭시로 고정시킨다.

#3000의 알루미늄 연마가루로 황동 연마기판에서 1차 연마 후 세륨옥사이드 (CeO_2)로 마무리 연마한다. 마무리 연마 기판으로 폴리우레탄이나 피치를 사용한다. 지나친 연마를 막기 위해 남은 클래딩 두께를 리퀴드 드롭(liquid drop) 방법^[12]으로 측정한다. 통상적으로 1550nm 파장에서 광섬유 코어와 굴절률이 같은 용액을 연마된 클래딩 표면 위에 놓았을 때 누설 손실이 5~6 dB 정도가 되도록 연마를 조절한다. 이때 최소 남은 클래딩 두께는 2.6~2.8 μm 로 추정된다. 연마된 표면위에 원기를 올려놓고 두 물질 사이 있는 공기층에서 발생하는 간섭 패턴(Newton ring)으로 측면 연마 후 표면 상태를 확인한다. 간섭 패턴이 없거나 한 개 정도 나타나면 연마 표면의 거칠기와 평탄도가 양호한 상태로 판정할 수 있다.

자외선 경화 폴리머인 NOA81을 평면도파로의 도파층으로 이용하였다. 이 물질의 굴절률은 1550 nm 파장에서 1.55이며 TE 편광이 TM 편광보다 0.0002가 더 크게 나타났다. NOA81의 점도를 조절하기 위해 용매(다이옥산)과 무게비로 7 대 3으로 희석하고, 이를 측면 연마 광섬유 블록위에 스펀 코팅하였다. 스펀 코팅 후 자외선으로 경화하고 60 °C에서 30분간 가열하여 용매를 제거한다.

그림 4는 NOA81 도파로층 위에 다양한 굴절률을 가지는 용액을 덮었을 때 소자의 파장응답이다. 식(2)와 (3)을 이용하여 추정된 NOA81의 두께는 11.5 μm 이며, 광섬유 모드는 평면도파로의 8차 모드와 9차 모드와 결합한다.

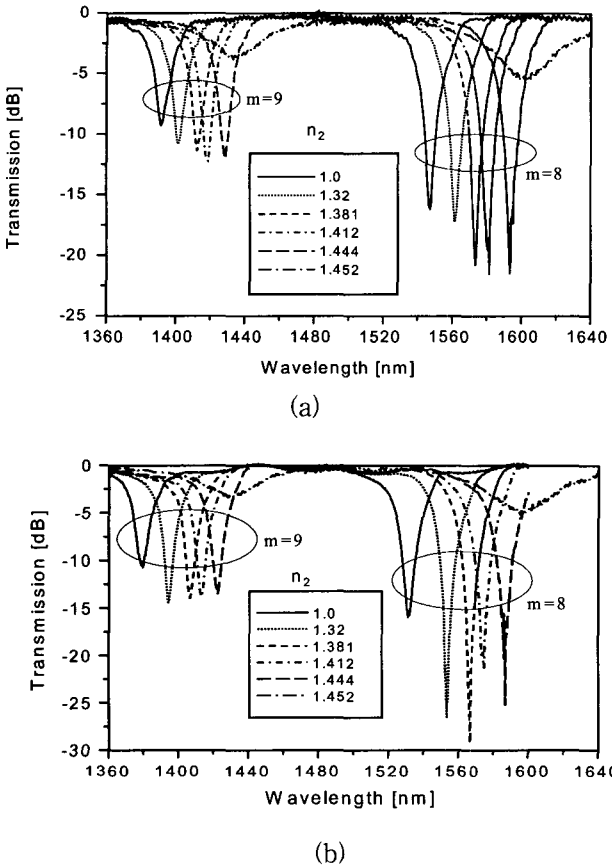


그림 4. 다양한 버퍼층의 굴절률(n_2)에 따른 소자의 파장응답(실험결과) (a) TE 편광, (b) TM 편광
Fig. 4. Wavelength response for various refractive index of the buffer layer (experimental results) (a) TE polarization, (b) TM polarization.

용액의 굴절률이 증가하면 공진 파장은 장파장으로 이동하는 현상을 보였다. 이는 평면도파로의 상부 클래딩의 굴절률(n_2)이 증가할수록 평면도파로의 유효굴절률도 함께 증가하여 공진 조건이 장파장으로 이동하기 때문이다. 용액의 굴절률이 광섬유 클래딩의 굴절률 부근에서 변할 때 공진 파장이 민감하게 변하는 사실을 알 수 있었다. 그러나 용액의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률(1.4456)보다 더 큰 경우 공진이 급격하게 약해지는 현상을 알 수 있다. 이 경우 광섬유와 평면도파로 사이에 위상 정합조건이 존재하지 않기 때문이

다. 초기의 공진 파장의 위치를 버퍼층의 굴절률로 제어할 수 있음을 의미한다. NOA 81 도파로의 열 광학 계수는 주위 온도와 대한 공진 파장의 관계로 구할 수 있으며 이 방법^[13]으로 측정된 결과 2.2×10^{-4} 로 나타났다.

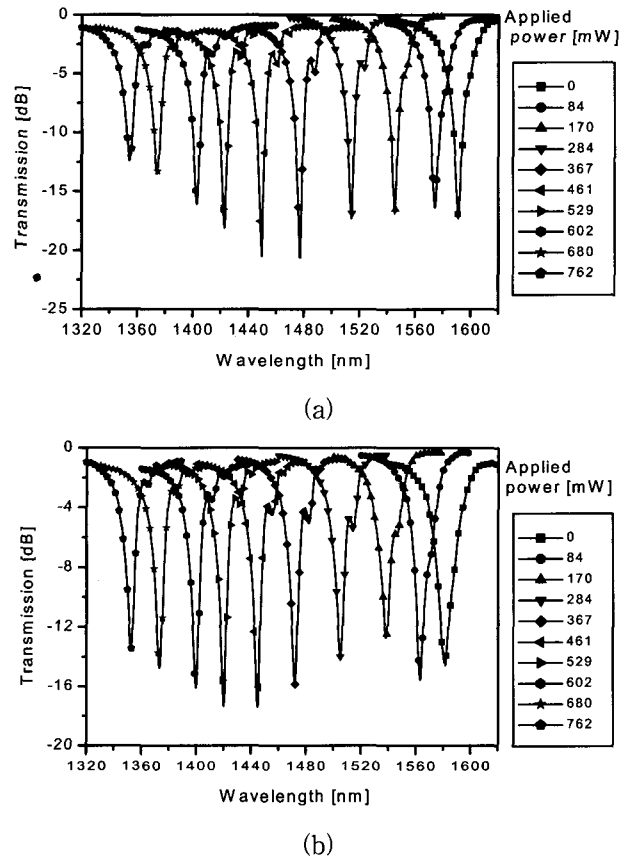


그림 5. 히터에 인가한 전력에 따른 파장응답의 변화(실험 결과), (a) TE 편광, (b) TM 편광
Fig. 5. variation of wavelength response in accordance with applied power to the heater (experimental result), (a) TE polarization, (b) TM polarization.

버퍼층의 재료로 젠포토닉스에서 제공한 ZPU13-RI와 APU12-RI를 적절하게 희석하여 광섬유 클래딩과 동일한 굴절률을 가지는 자외선 경화 폴리머를 이용하였다. 버퍼층의 두께는 3~4 μm 정도가 되도록 스펀 코팅 속도를 조절하였다. 버퍼층의 두께가 너무 얇으면 열 전극에 의한 광의 흡수가 발생 할 수 있다. 버퍼층을 형성 후 마이크로 스트립 형태의 열 전극을 버퍼층위에 진공 열 증착으로 형성 시켰다. 마이크로 스트립 히터의 재료로 금(Au)를 사용하였고, 길이는 5mm,

폭은 150 μm , 저항은 17 Ω 이었다. 히터의 두께는 약 50 nm 정도로 예상된다. TE 편광과 TM 편광의 공진 파장의 차이는 약 7 nm가 발생하였으며 이는 폴리머층 재료의 복굴절과 평면도파로의 구조적 복굴절이 동시에 기인한 결과이다. 마이크로 스트립 히터에 전류를 인가하면 비퍼층과 폴리머층 그리고 광섬유까지 열이 전달된다.

광섬유는 열광학 효과가 폴리머의 1/10 이하로 낮기 때문에 공진 파장의 이동 현상은 폴리머층의 열광학 효과에 주로 기인한다. 히터에 인가된 전력에 따른 파장 응답의 변화를 측정된 결과가 그림 5에 나타나 있다. 인가된 전력과 공진파장의 이동 거리는 거의 선형적인 관계를 유지하였다. 762 mW의 전력으로 약 230 nm의 넓은 공진 파장 가변 특성을 얻을 수 있었다. 공진 파장에서 소멸비는 20 dB 정도로 나타났고 공진 밖의 파장 영역에서 소자의 삽입 손실은 1 dB 부근으로 측정 되었다. 이러한 넓은 가변 특성을 이용하면 파장 분할 다중화 통신에서 가변 채널 드롭 필터(channel drop filter), 혹은 광섬유 증폭기의 이득 평탄화 필터 등으로 응용 가능 할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

측면 연마된 편광유지 광섬유와 폴리머 평면도파로 결합기를 이용한 가변 광 필터를 구현 하였다. 평면도파로의 도파층과 비퍼층의 굴절률과 공진파장의 사이의 관계를 분석 하였다. 제작된 가변 결합기는 폴리머의 열광학 효과를 유도하기 위한 마이크로스트립 히터를 이용하여 0.76 mW의 전력으로 230 nm 의 넓은 파장 가변 특성을 보였다. 3 dB 대역폭은 25 nm 정도로 나타났고 공진 파장에서 소멸비는 15 dB 부근 이었고 삽입손실은 1 dB 미만 이었다. 전극에 인가된 전력으로 1550nm 파장과 1310 nm 파장을 선택적으로 투과 및 여과 시킬 수 있기 때문에 제안된 가변 필터는 양방향 광통신이나 파장분할 다중화 통신에서 채널 드롭 필터로 활용 할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] S. A. Hamilton, D. R. Yankelevich, A. Knoesen, R. T. Weverka, R. A. Hill, and G. C. Bjorkund, "

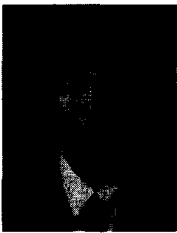
- Polymer in-line fiber modulators for broadband radio-frequency optical links," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 15, no. 2, pp. 741-751, 1998.
- [2] A. Andreev, Bl. Pantchev, Pantchev, P. Danesh, B. Zafirova, and E. Karakoleva, "a-Si:H film on side-polished fiber as optical polarizer and narrow-band filter," *Thin Solid Films*, vol. 330, pp. 150-156, 1998.
- [3] 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, 1996.
- [4] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Low voltage optical fiber switch," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, No. 1A/B, pp. L42-L45, 1998.
- [5] R. B. Charters, A. P. Kuczynski, S. E. Staines, R. P. Tanam and G. J. Ashwell, "In-line fibre optic channel dropping filter using Langmuir-Blodgett films," *IEE Electron. Lett.*, vol. 30, no. 7, pp. 594-595, 1994.
- [6] L. S. Mauchline, W. I. Madden and W. Johnston, "Low voltage tunable in-line channel dropping filter using liquid crystal waveguide overlays," *IEE Electron. Lett.*, vol. 30, no. 11, pp. 985-986, 1997.
- [7] K. T. Kim, J. W. Song, "Investigation of thermo-optically tunable fiber-to-planar waveguide coupler," *Optics Comm.*, vol. 205, pp. 113-122, 2002.
- [8] S. S. Lee, Y. S. Jin, and T. K. Yoo, "Polymeric tunable optical attenuator with an optical monitoring tap for WDM transmission network," *IEEE Photon. Tech Lett.*, vol. 11, pp. 590-592, May, 1999.
- [9] S. Toyoda, N. Ooba, T. Kitoh, T. and Kurihara, T. maruno, "Thermo-optic device using polymer waveguide," *IEICE*, vol. E85C, no. 6, pp. 1264-1269, 2002.
- [10] K. T. Kim, D. S. Yoon, and G. I. Kweon, "Optical properties of side-polished polarization maintaining fiber coupled with a high index planar waveguide," *Opt. Comm.* vol. 230, no 1-3, pp. 137-144,

2004

- [11] K. T. Kim, D. S. Yoon, C. H. Kim, and J. P. Mah, "Optical properties of single-mode side-polished fiber covered with multilayer planar waveguide including metal films," *Jpn. J. App. Phys.*, vol. 42, no. 11, pp. 6910-6915, 2003.
- [12] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Side-polished fiber," *Appl. Optics*, vol. 31, no. 18, pp. 3438-3447, 1992.

- [13] W. G. Jung, S. W. Kim, K. T. Kim, E. S. Kim, and S. W. Kang, " High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single-mode fiber covered with the polymer planar waveguide," *IEEE Photonics Tech Lett*, vol. 13, no. 11, pp.1209-1211, 2001.

 저 자 소 개



윤 대 성(정회원)

2002년 호남대학교 전자공학과 학사 졸업.

2004년 호남대학교 전자공학과 석사 졸업.

<주관심분야 : 광통신, 광섬유센서>



김 광 택(정회원)

1989년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.

1991년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업.

2000년 경북대학교 전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 광통신, 광섬유센서>