

論 文

光纖維를 이용한 Magneto-Optic Current Transformer實現에 관한 研究

正會員 李 相 孝* 正會員 金 恩 洙**

A Study on the Realization of Magneto-Optic Current Transformer by Optical Fiber

Sang Hyo LEE* and Eun Soo KIM**, Regular Members

要 約 本論文에서는 MCT(magneto-optic current transformer)를 구성하기 위한 單--모우드光纖維의 偏光特性 및 파라데이回轉에 대한 分析 및 實驗을 하였다. 分析過程에서 單--모우드光纖維는 線形遲延器로 모델링하였으며 측정결과 순수birefringence는 2.57°/m로 나타났고 구부림에 의한 birefringence는 구부림 반지름의 제곱에 반비례하였다. 그리고 파라데이回轉에 대한 理論的解析의 결과 자계의 세기(H)에 대한 편광회전감도(F)는 $F/H=1.4 \times 10^{-4} \text{rad}/(\text{A/m})$ 로 나타났다.

ABSTRACT In this paper, the polarization and Faraday rotation properties of the single mode optical fiber have been investigated for magnto-optic current transformer application. On the analysis, the optical fiber is modeled as a linear retarder and the intrinsic birefringence of the optical fiber is approximately found to be 2.57°/m from the measurement, and the bend-induced birefringence is proportional to the inverse square of bending radius. The polarization rotation sensitivity is found to be $F/H=1.4 \times 10^{-4} \text{rad}/(\text{A/m})$ from the analysis of Faraday rotation of single mode optical fiber.

1. 序 論

一般的으로 光纖維속을 진행하는 빛은 여러 가지 원인에 의해 光學的으로 균일하지 않은 매질속을 진행할 때와 같은 偏光特性 즉 birefringence가^{(1),(2)} 나타나는데 最近에 이러한 光纖維의 偏光特性을 이용하여 光纖維를 計測用sensor로서 應用하고자 이에 대한 많은 研究가⁽³⁾진행되고 있다. 理想的인 單--모우드光纖維의 경우 그 구성이 균일하며 축대칭이 되므로 birefringence가 나타

나지 않지만 光纖維의 제조과정에서 생기는 결함들 즉 불균일한 stress, 光纖維core의 ellipticity등에 의하여 실제의 單--모우드光纖維에서는 birefringence를 흔히 관찰할 수 있다⁽⁴⁾.

근래에는 이러한 효과들을 거의 없앨 수 있는 방법⁽⁵⁾들이 開發되어 intrinsic birefringence가 상당히 작은 單--모우드光纖維가 개발되고 있지만 이러한 光纖維라도 外部에서 作用할 수 있는 여러 가지 원인 즉 비틀림(twisting)⁽⁶⁾, 구부러짐(bending)⁽⁷⁾, 온도, 압력⁽⁸⁾ 및 磁氣場등에^{(9),(10)}의해서 birefringence가 유도되는데 이 중에서 磁氣場에 의한 偏光特性을 Faraday(magneto-optic)효과라 하며 MCT(magneto-optic current transformer)의 기본이론이 된다.

*** 光云大學電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University,
Seoul, 132 Korea.
論文番號 : 83 - 19 (接受 1983. 7. 25)

즉 光纖維에 외부 자기장이 인가되면 optical activity 즉 circular birefringence가 나타나 光纖維 속을 진행하는 선형편광된 빛의 편광각(polarization angle)이 회전되므로 이를 측정하면 상대적인 전류의 측정이 가능하다²⁾.

따라서 本論文에서는 MCT구성을 위한 光纖維의 중요 편광특성인 intrinsic & bend-induced birefringence 와 Faraday 효과에 대한 理論的解析 및 實驗結果에 대해 論하고자 한다.

2. Intrinsic birefringence

일반적으로 單一모우드 光纖維에서는 서로 수직편광된 2개의 導波모우드가 존재한다. 理想的인 光纖維에서는 서로 같은 위상속도로 전파되나 실제 光纖維에서는 제조과정에서 나타나는 thermal stress 및 core의 타원성 등에 의해 birefringence 혹은 phase retardation이 생기게 되고 결과적으로 線形偏光된 빛은 光纖維를 통과하게 되면 elliptical하게 편광되는데 이러한 光纖維의 특성은 光纖維를 線形遲延器(linear retarder)로 모델링함으로써 分析할 수 있다³⁾.

즉 線形遲延 δ 를 갖는 光纖維에 光纖維의 slow 축에 대해 θ 각을 이루는 선형편광을 입사시키면 光纖維出力에서는 일반적으로 타원편광으로 나타나게 된다. 따라서 이러한 타원편광으로부터 편광도와 입출력 편광각의 관계를 구하면

$$P = (\cos^2 2\theta + \cos^2 \delta \sin^2 2\theta)^{1/2} \tag{1}$$

$$\tan 2\phi = \cos \delta \tan 2\theta \tag{2}$$

와 같이 주어진다.

식(1)에서 P 값은 入射光과 x 축이 이루는 각도 θ 에 따라

$$P = \begin{cases} 1; & \theta = m\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ \cos \delta; & \theta = (2m+1)\frac{\pi}{4} \end{cases} \tag{3}$$

와 같이 주어지며 $P=1$ 일 때는 선형편광됨을 의

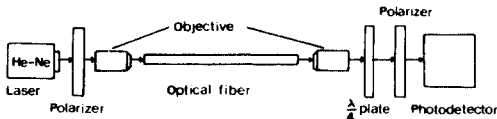


그림 1 Intrinsic birefringence 실험장치
Intrinsic birefringence measurement apparatus.

미하고 $P=0$ 일 때는 원편광된 빛을 의미하며 $0 < P < 1$ 일 때는 타원편광을 의미한다.

따라서 적당한 검출회로에 의해 P 값을 측정할 수 있으므로 光纖維의 intrinsic birefringence δ 값을 측정할 수 있다⁴⁾.

그림 1은 intrinsic birefringence를 測定하기 위한 실험장치로서 그림 1과 같이 $\lambda/4$ plate를 光纖維의 出力側에 놓고 회전시키면 타원광의 장축과 단축이 $\lambda/4$ plate의 fast, slow 축과 일치할 때 직선편광된 빛이 나오게 되며 이것은 出力側의 선형 편광기에 의해 分析된다.

이 때 $\lambda/4$ plate의 fast 축과 출력축의 선형편광기 축과 이루는 각 ξ 는 偏光파라미터 P 와 다음의 관계가 있다⁵⁾.

$$P = \cos 2\xi \tag{4}$$

그러므로 ξ 를 측정함으로써 P 값을 알 수 있다. 따라서 초기상태를 적당히 조절함으로써 입력 편광기와 $\lambda/4$ plate의 상대적인 방위를 측정할 수 있으며 입력 편광기의 변화에 대해 $\lambda/4$ plate의 방위 ξ 를 측정함으로써 절대각 θ 와 ϕ 가 유도되고 식(1),(2)에 의해 $\cos \delta$ 가 결정된다. 따라서 입력 선형 편광기 $\lambda/4$ plate와 출력 선형 편광기의 회전각을 조절함으로써 광검출기에 의해 intrinsic birefringence를 측정할 수 있다.

본 실험에 사용된 單一모우드 光纖維의 특성은 표 1과 같이 실험결과 intrinsic birefringence는 $2.57^\circ/\text{m}$ 로 나타났다⁶⁾.

3. Bend-induced birefringence

일반적으로 光纖維가 그림 2와 같이 구부림

표 1 光纖維의 特性
Properties of the fiber.

core composition	$\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$
cladding composition	$\text{B}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$
core diameter	$4\mu\text{m}$
overall fiber diameter	$130\mu\text{m}$
relative index difference	1×10^{-3}
coating material	silicone

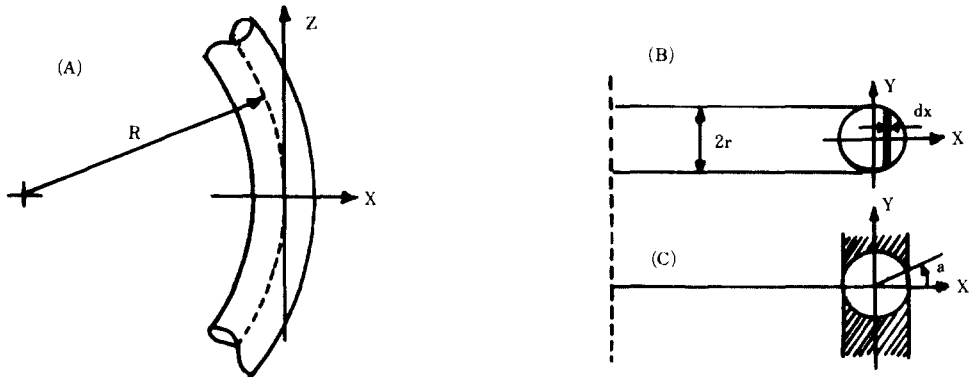


그림 2 구부린 광섬유의 구조
Geomtry of a bent fiber.

(bending)을 받았을 때 birefringence가 나타나는데 이러한 光纖維의 편광상태변화는 elastic stress field이론으로 해석될 수 있다.

Ulrich의 해설결과에⁽⁷⁾ 의하면 코어 굴절률이 n 인 單一모우드 光纖維에서 birefringence는

$$\delta_b = k_x - k_y \approx k(\delta n_x - \delta n_y) \quad (5)$$

와 같이 주어지며 여기에서 k_x, k_y 는 x, y 축에 각각 편광된 HE_{11} 모우드의 전파상수이며 k 는 자유공간에서의 전파상수이다. 탄성광 굴절률 변화인 δn_x 와 δn_y 는 $\delta n_i = -(n^3/2) \sum P_{ij} \epsilon_j$ 의 관계식에 의해 계산될 수 있다⁽⁸⁾. 여기에서 P_{ij} 는 응력 변형광 계수(strain optical coefficient)이고 ϵ_j 는 응력 변형 텐서 성분을 나타낸다. Poisson비 ν 를 사용하면

$$\epsilon_x - \epsilon_y = (\sigma_x - \sigma_y)(1 + \nu)/E \quad (6)$$

가 되므로 구부림에 의한 birefringence δ_b 는 결과적으로

$$\delta_b = 0.25 kn^3 (P_{11} - P_{12})(1 + \nu) k^2 r^2 \quad (7)$$

이 된다.

따라서 구부림에 의한 birefringence는 구부림 반지름 제곱의 역수에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

실리카의 경우 식(7)에 상수값 $n=1.46, \nu=0.17, \lambda=6328 \text{ \AA}, P_{11}-P_{12}=-0.15$ 를 代入하면⁽⁹⁾

$$\delta_b = -7.7 \times 10^7 k^2 r^2 \text{ deg/m} \quad (8)$$

와 같이 주어진다.

구부림에 의한 birefringence를 측정하기 위한 시스템은 그림 3과 같다. 구부림 이외의 다른 영향을 받지 않도록 원통형 former에 光纖維를 조심스럽게 감은 후 임의의 선형편광을 입사시키면 입력선형편광은 光纖維를 통과함에 따라 구부림에 의한 birefringence에 의해 光纖維出力에서는 타원편광으로 나타난다.

이러한 출력 타원편광으로부터 구부림에 의한 birefringence를 구하기 위해 intrinsic birefringence의 경우와 같은 annulling방법을 사용하였다.

즉 光纖維의 出力光에 $\lambda/4$ plate를 놓고 회전시키면 $\lambda/4$ plate를 통과한 빛이 선형편광이 되는 점이 나타나게 된다. 따라서 그 위치에서 $\lambda/4$ plate를 통과한 빛은 출력 편광기에 의해 annulling됨으로써 분석된다.

이 때 출력 타원편광의 장, 단축은 $\lambda/4$ plate의 fast, slow 축과 일치하게 된다. 또한 편광도는 $\lambda/4$ plate의 fast 축방향과 분석기의 수광방향

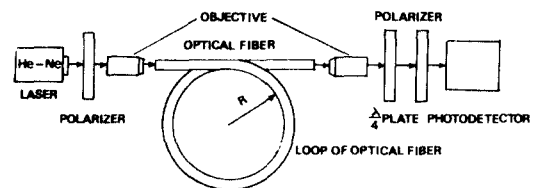


그림 3. 구부림에 의한 birefringence 측정 장치도
Block diagram of the bend-induced birefringence measurement system.

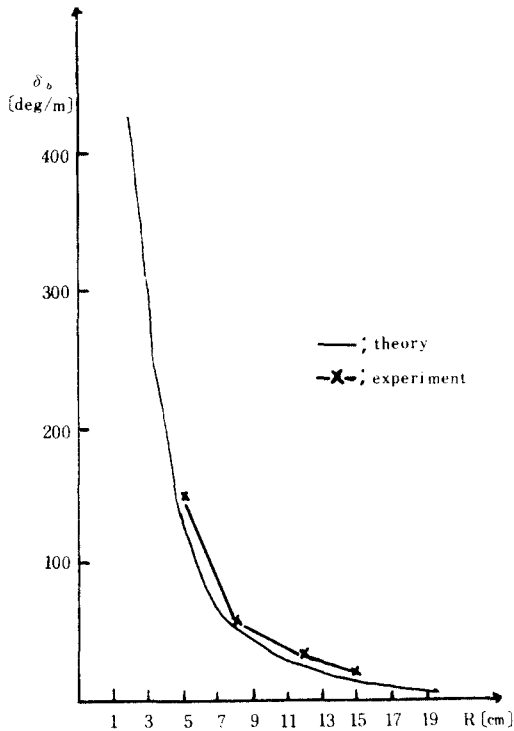


그림 4 단일 모우드 광섬유의 구부림에 의한 birefringence. Bending birefringence of single mode fiber.

이 이루는 각 δ 에 의해 식(4)와 같이 주어지므로 δ 값을 측정함으로써 P 값을 구하게 되고 식(1),(2)로부터 구부림에 의한 birefringence를 구할 수 있다¹⁰⁾.

실험결과 구부림이 심한 ($R < 3\text{cm}$) 경우에는 심한 birefringence가 나타나고 구부림에 의한 birefringence는 구부림 반지름 제곱의 역수에 거의 비례함을 알 수 있다.

그림 4는 구부림에 의한 birefringence의 이론 및 실험결과를 나타낸 것이다.

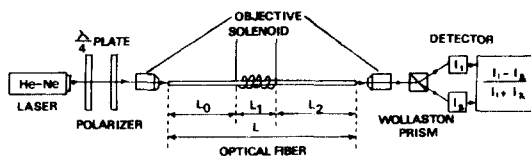


그림 5 파라데이효과를 이용한 전류측정 시스템도. Block diagram of the current measurement system using Faraday effect.

4. Faraday rotation

단일 모우드 광섬유에 빛의 진행방향과 평행하게 자계가 인가되면 입사광의 편광방향이 회전하여 소광수에 나타난다. 이 주 자계의 영향에 의하여 광섬유는 circular birefringence (optical activity) 현상이 나타난다. 이것을 Faraday rotation이라 하며 MCT의 기본원리가 된다^{12),17)}.

선형편광된 빛의 회전량 F 는 인가된 자계의 세기 H 와 자계의 영향을 받은 광섬유의 길이 l 에 선형적으로 비례한다¹²⁾.

$$F = V \int_l H \cdot dl \quad (9)$$

(V : verdet 상수)

그림 5는 MCT의 기본 시스템으로 광섬유가 소광관으로 평행하게 자계의 영향을 받으면 고유 birefringence에 의한 위상지연과 파라데이효과에 의한 편광회전이 복합된 형태로 나타나는데 Wollaston 프리즘에 의하여 두 방향의 선형편광성분이 공간적으로 분리되어 2개의 광검출기로 검출된다.

그림 6은 intrinsic birefringence와 Faraday 효과의 상호관계를 해석하기 위한 모델이다. 즉 길이 l 인 광섬유의 중간 l_0 에 빛의 진행방향과 평행하게 자계가 인가되면 l_0 에서는 δ_0 만큼의 위상지연이 생기고 l_1 에서는 자계에 의한 파라데이회전과 δ_1 의 위상지연이 복합적으로 나타나며 l_2 에서는 δ_2 만큼의 위상지연이 나타난다.

따라서 入力偏光狀態가

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

일 경우 Jones matrix를 사용하여 출력의 선형성분을 구하면 다음과 같다^{18),19)}.

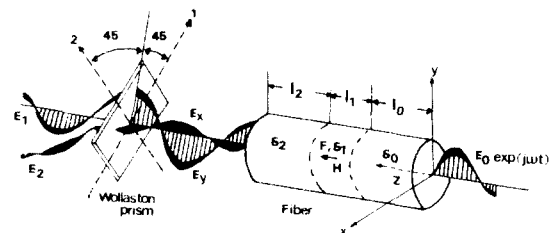


그림 6 Birefringence와 파라데이회전의 상호관계. Interaction of birefringence and Faraday rotation.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -BE_0 \exp [j(\omega t + \delta_2/2)] \\ |A|E_0 \exp [j(\omega t + \delta_2/2 - \chi)] \end{pmatrix} \quad (11)$$

위 식에서 χ 는

$$\chi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\delta_1/2}{[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \tan [F^2 + (\delta_1/2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

이 된다.

이 出力光은 광학축 1, 2가 y 축과 45° 의 각으로 놓인 Wollaston 프리즘을 통과시켜 실험적으로 파라데이회轉과 birefringence를 分析할 수 있다.

그림 6 과 같이 공간적으로 분리되고 직선편광된 빛 E_1, E_2 가 프리즘을 통과하여 광검출기로 검출되며 그 편광방향은 1, 2 축과 각각 일치한다.

이 두 빛의 세기는

$$E_1 = \frac{E_x + E_y}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{E_x - E_y}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

로 나타난다.

아날로그회로에 의해 구할 수 있는 신호 S 를 정의하면

$$S = \frac{|E_1|^2 - |E_2|^2}{|E_1|^2 + |E_2|^2} \quad (15)$$

와 같고 식(11)과 식(13), (14)를 식(15)에 代示하여 정리하면

$$S = 2|A|B \cos (\chi + \delta_2) \quad (16)$$

와 같은 식을 얻을 수 있다.

자계의 세기 및 광섬유의 길이의 조절로 가능한 $F \gg \delta_1/2$ 의 조건으로부터 식(16)을 근사화하면

$$T = \sin 2F \quad (17)$$

로 주어지므로 광섬유를 전류에 의해 유도된 자계를 측정하는데 쉽게 응용될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 일반적으로 자계에 의한 파라데이회轉角은 상당히 작으므로 \sin 함수의 성질을 이용하면 $T \approx 2F$ 로 근사화할 수 있다.

따라서 위 식에 光纖維 파라미터값을 代示하여 검출기 출력 T 와 자계의 세기 H 의 관계를 구하면 그림 7 과 같이 선형적으로 주어진다.

그림에서 자계의 세기에 대한 검출기 출력의 선형관계는

$$T = 2.8 \times 10^{-5} H \quad (18)$$

로 주어지므로 자계에 의한 polarization rotation sensitivity는

$$F/H = 1.4 \times 10^{-5} \text{ rad}/[\text{A/m}] \quad (19)$$

로 주어진다.

따라서 $\sin x = x$ 의 근사는 $x < 14^\circ$ 에서 1%오차한계를 가지므로 식으로부터 $17\text{K}[\text{A/m}]$ 까지의 자계의 세기를 1%이내의 오차로 선형적으로 측정가능함을 알 수 있다.

5. 結 論

本論文에서는 MCT를 구성하기 위한 單一모우드 光纖維의 偏光特性 및 파라데이회轉에 關하여 理論 및 實驗分析을 하였다.

分析過程에서 單一모우드 光纖維는 선형자연기로 모델링하였고 Jones 행렬을 이용하여 intrinsic birefringence를 해석하였으며 측정결과 $2.57^\circ/\text{m}$ 의 낮은 값으로 나타났다.

光纖維가 구부림을 받았을 때 나타나는 birefringence 현상은 구부림 반지름 제곱의 역수에 선형적으로 변화하는 것이 理論 및 實驗에 의하여 分析되었다.

그리고 光纖維를 전류 측정용 sensor로 사용하기 위한 이론인 單一모우드 光纖維의 파라데이회轉을 Jones 행렬을 사용하여 해석한 결과 편광회轉감도가 $F/H = 1.4 \times 10^{-5} \text{ rad}/[\text{A/m}]$ 로 나타났다.

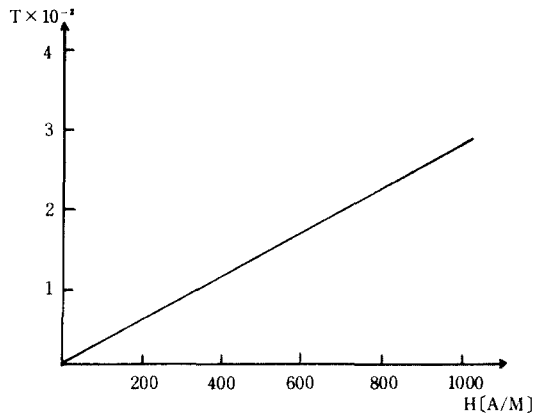


그림 7 자계의 세기에 대한 검출기 출력 그래프
Graph of detector output against magnetic field intensity.

본 연구는 1982년도 문교부 학술연구 조성비로 이루어진 논문임.

参 考 文 献

- (1) V. Ramaswany et al., "Polarization effects in short length single mode fibers," B. S. T. J., vol. 57, no. 3, pp. 635, 1978.
- (2) P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-17, no. 1, p. 15, 1981.
- (3) T. G. Giallorenzi et al., "Optical fiber sensor technology," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-18, no. 4, pp. 628, 1982.
- (4) Nobuyuki Imoto et al., "Birefringence in single mode optical fiber due to elliptical core deformation and stress anisotropy," IEEE Quantum Electronics, vol. QE-16, no. 11, p. 1267, 1980.
- (5) H. Schneider et al., "Low birefringence single mode optical fibers; Preparation and polarization characteristics," Appl. Opt. vol. 17, p. 3035, 1978.
- (6) R. Ulrich & A. Simon, "Polarization optics of twisted single mode fibers," Appl. Opt., vol. 18, no. 8, p. 2241, 1979.
- (7) R. Ulrich et al. "Bending-induced birefringence in single mode fibers," Opt. Lett., vol. 5, no. 6, p. 273, 1980.
- (8) G. B. Hoeker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," Appl. opt. vol. 18, no. 9, p. 1445, 1979.
- (9) S. C. Rashleigh, "Magnetic field sensing with a single mode fiber," Opt. Lett., vol. 6, p. 19, 1981.
- (10) 金恩洙, 朴漢奎, "Single mode optical fiber의 polarization과 magneto optic 특성에 관한 연구," 대한전자공학회, 1982년도 국제총회 학술발표대회, vol. 5, no. 1, p. 116, 1982.
- (11) J. F. Nye, "Physical properties of crystals," Oxford press, 1957.
- (12) A. Papp & H. Harms, "Magneto-optical current transformer," Appl. Opt., vol. 19, no. 22, pp. 3729, 1980.
- (13) A. M. Smith, "Automated birefringence measurement system," J. phys. E, vol. 12, 1979.
- (14) 金恩洙, 朴漢奎, "단일모우의 광섬유의 Birefringence 특성에 관한 연구" 한국통신학회지 제 7권, 제 4호, p. 161, 1982.
- (15) D. Gray, "American Institute of Physics Handbook," New York, McGraw Hill, 1976.
- (16) A. M. Smith, "Birefringence induced by bends and twists in single mode optical fiber," Appl. Opt., vol. 17, no. 5, p. 2606, 1980.
- (17) A. M. Smith, "Optical fiber for current measurement application," Opt. and Laser Tech, p. 25, 1980.
- (18) W. J. Tabor, & F. S. Chen, "Electromagnetic propagation through material, possessing both Faraday rotation and birefringence," J. Appl. phys., vol. 40, no. 7, p. 2750, 1969.
- (19) H. Harms, A. Papp, "Magneto-optical properties of index gradient optical fibers," Appl. Opt. vol. 15, no. 3, p. 799, 1976.



李 相 孝 (Sang Hyo LEE) 正會員
 1941年 5月 23日生
 1969年 2月: 首都工大電氣工學科卒業
 1971年 2月: 延世大大學院電氣工學科卒業 (工學碩士)
 1981年 2月: 延世大學院電氣工學科修了 (工學博士)
 1980年~現在: 光云大學電子工學科助教授



金 恩 洙 (Eun Soo KIM) 正會員
 1955年 8月 1日生
 1978年 2月: 延世大學校電子工學科卒業
 1980年 2月: 延世大學校大學院電子工學科卒業 (工學碩士)
 1980年 3月~現在: 延世大學校大學院電子工學科博士課程
 1981年 3月~現在: 光云工科大学電子工學科助教授