

PMN/PT[0.9 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.1 PbTiO₃]에 La이 첨가된 광섬유 전왜변환기를 이용한 간섭계형 광섬유 전계센서의 특성분석

강원석 · 이영탁 · 강현서 · 정래성 · 이경식

성균관대학교 전자공학과

장 현 명

포항공대 재료공학과

(1995년 9월 29일 받음)

전왜재질 0.9 PMN/0.1 PT에 각각 조성비율이 1%, 2%, 3%의 La이 첨가된 3종류의 재질을 광섬유에 부착하여 광섬유 전왜변환기를 제작하였다. 실험결과 La 3% 첨가된 재질의 전왜계수가 3.38 kHz에서 $3.87 \times 10^{-16} (\text{m/V})^2$ 로 가장 크다는 것을 알 수 있었으며 La을 첨가함으로써 해서 이력이 줄어들음을 알 수 있었다. La 3%인 재질로 구현된 광섬유 전계센서의 최소감지전계는 $2.08 (\text{V/m})/\sqrt{\text{Hz}}$ 였으며 가변영역 40 dB 이상에 걸쳐서 선형성이 우수하였다.

I. 서 론

광섬유는 낮은 손실과 절연성, 무유도성등의 장점을 갖고 있으며 외부의 물리적 자극, 압력, 진동, 온도, 자기장, 전류, 전기장등에 대해 전송특성이 매우 민감한 특성을 지니고 있다. 따라서 광섬유를 이용하여 이러한 물리량을 측정하고자 하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 특히 광섬유를 이용한 전계센서에 대한 연구개발이 세계 각지에서 활발히 진행되어 오고 있다.

광섬유를 이용한 광섬유 전계센서는 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 한쪽 경로에 전계를 가했을때 변형되는 재질을 부착시켜 광섬유내 도파광의 위상변화로부터 전계의 크기를 측정할 수 있는 간섭계형 광섬유 전계센서가 현재 주로 사용되고 있다.^[1,2] 광섬유의 한쪽 경로에 부착되는 재질은 인가전계에 따른 변위의 변화 양상에 따라 크게 압전재질(Piezoelectric material)과 전왜재질(Electrostrictive ceramic)로 구분된다. 압전재질은 인가전계에 따른 변위가 선형적인 증가를 보이는 소재로서 PVDF(Polyvinylidene fluyride) 및 PZT의 재질이 광섬유 전계센서로 사용되었다.^[1,2]

전왜재질은 인가전계에 대한 변위의 발생이 식 (1)과 같이 전계의 제곱에 비례하는 비선형 특성을 갖고 있기 때문에 dc 바이어스 전계나 ac dithering 전계를 가해 줌으로써 감도를 크게 높일 수 있으며, 특히 dc나 저주파

신호를 측정하는데 아주 유망하다.^[3] 그러나 현재까지 광섬유 전계센서의 전왜재질로 사용된 재질은 Ba:PZT^[4], PMN(lead magnesium niobate)이 고작이다. 본 연구 이전의 결과로써 PMN/PT[0.9Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.1 PbTiO₃]의 재질을 선택하여 광섬유 전계센서의 전왜재질로 사용하여 광섬유 전계센서의 특성을 분석한 결과 $0.22 (\text{V/m})/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 최소감지전계값을 얻었다.^[5]

따라서 본 연구에서는 전왜특성이 우수하다고 판단되는 PMN/PT의 전왜재질을 이용하여 전왜 특성의 온도 의존성을 개선시키기 위해 La을 여러 비율로 첨가한 PMN/PT 전왜재질을 3개 선택하여 광섬유 전왜변환기를 제작한 후, La의 첨가 비율에 따른 간섭계형 광섬유 전계센서의 여러가지 특성에 대해서 실험 분석하고자 한다.

2장에서는 광섬유 전계센서의 기본 원리와 제작된 광섬유 전계센서의 구성에 대해 설명하고 3장에서는 La 첨가된 전왜재질에 따라 구성된 간섭계형 전계센서의 특성이 어떻게 되는지 실험을 통해서 분석해 보았다.

II. 전계센서의 기본원리 및 광섬유 전왜변환기의 제작

전왜재질에서 생기는 변형(strain) ϵ 는 가해지는 전계 E 의 제곱에 비례하며 변형 즉, 전왜(electrostriction)를

식으로 나타내면,

$$e = ME^2 \quad (1)$$

와 같으며 여기서 M 은 재질 상수인 전왜계수(electrostrictive coefficient)이다. 전왜재질에 ac 신호 $E_{\omega}\cos\omega t$ 와 dc 신호 E_{dc} 의 합으로 표시되는 전계신호 $E = E_{dc} + E_{\omega}\cos\omega t$ 가 가해지면 e_{dc} , 고차 harmonic과 더불어 e_{ω} 의 변형 성분이 발생된다.

$$e_{\omega} = (2ME_{dc}E_{\omega})\cos\omega t \quad (2)$$

식 (2)에서 보듯이 강한 dc 바이어스 전계를 전왜재질에 가했을 때 작은 ac 신호의 변화는 큰 변형 성분 e_{ω} 를 발생시킨다. 따라서 전왜재질을 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 한쪽 경로에 부착하여 상기와 같은 바이어스 전계를 인가하면 간섭계내의 ω 성분 위상변위의 크기 Φ_{ω} 는 식 (3)과 같다.

$$\Phi_{\omega} = 2k_{eff}MLE_{dc}E_{\omega} \quad (3)$$

여기서 L 은 전왜재질에 부착된 단일모드 광섬유 길이이며, k_{eff} 는 유효전파상수로 코어 굴절율이 n 이고 진공 중에서의 파장을 λ 라고 할때 다음과 같이 나타낸다.

$$k_{eff} = (2\pi n/\lambda)\xi$$

여기서 ξ : strain-optic factor로 실리카 광섬유의 경우 0.78이다. 위상변위의 크기 Φ_{ω} 는 식 (3)에서 알 수 있듯이 ac 신호 및 dc 신호 크기의 곱에 비례하며^[3,4] 간섭계의 출력을 분석함으로써 얻어진다.

본 연구의 광섬유 전왜변환기를 제작하기 위해 선택된 전왜재질은 PMN/PT에 La이 1%, 2%, 3% 첨가된 재질로써 샘플의 크기는 각각 0.7 cm×0.4 cm×0.02 cm, 1.2 cm×0.4 cm×0.02 cm, 0.6 cm×0.4 cm×0.019 cm이다.^[6] 그리고 전왜변환기의 특성실험을 쉽게할 수 있도록 재질 위에 두께방향으로 전극을 제작하였고 재질 위에 길이 방향으로 Mach-Zehnder 간섭계의 한쪽 경로에 있는 광섬유를 그림 1과 같이 부착하여 광섬유 전왜변환기를 제작하였다.

간섭형 광섬유 전계센서의 성능은 일반적으로 광섬유 전왜변환기의 특성에 따라 크게 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 3종류의 광섬유 전왜변환기에 대한 특성분석실험을 하였다. 여기에서 사용한 실험장치는 외부변화에 대해서 능동적으로 보상시켜 안정화시켜줄 수 있도록 구성된 간섭계(active homodyne interferometer)로 자왜효과(magnetostrictive effect)를 기초로 한 광섬유 자체센서와 같다.^[7]

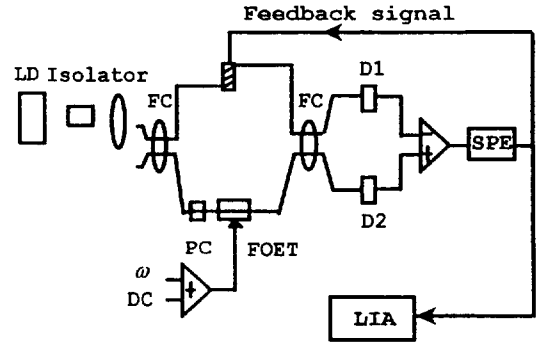


그림 1. Schematic of the Fiber Optic Interferometer to measure ac electric fields.

앞에서 설명한 3종류의 광섬유 전왜변환기로 간섭형 광섬유 전계센서를 그림 1과 같이 구성하였다. 이 광섬유 전계센서는 파장이 830 nm (Hitachi 8314)인 반도체 레이저와 편광조절기(Polarization Controller: PC), 전왜변환기, 단일모드 광섬유, 광섬유 결합기(Fiber Coupler: FC), 포토다이오드 그리고 전자회로부 등으로 구성되어 있다. 특히 편광조절기는 양쪽 경로를 통과하는 빔의 편광상태를 같게하여 줌으로써 센서의 감도를 높이기 위해 사용되었으며, 두개의 광섬유 결합기는 2×2 3 dB 방향성 결합기로 E-tek 회사 제품이다. 그리고 광섬유 전왜변환기는 sensing arm에 접속시키고 이 변환기에 ac 신호를 인가한 뒤 생기는 응답은 간섭계의 두개의 출력단에서의 광신호를 차등증폭기를 거쳐 LIA(Lock-In Amplifier)로 분석함으로써 알 수 있다. 이때 위상차는 작은 교류 전압 신호를 PZT에 인가한 후 간섭무늬의 변화수를 측정함으로써 알 수 있다. 인가하는 전계신호에 대해서 위상이 얼마나 변하는지 측정함으로써 광섬유 방향의 전왜재질의 전왜계수를 측정할 수 있다.

III. 광섬유 간섭 센서의 특성실험 및 결과

광섬유 전계센서는 그림 1과 같이 한쪽 경로에 광섬유 전왜변환기(Fiber Optic Electrostrictive Transducer, FOET)를 부착하여 구성하였다. 그림 2와 그림 3은 PMN/PT계 전왜재질에 La이 1%, 2%, 3% 첨가됨에 따라 dc 바이어스 전계에 대한 ac 전왜응답(electrostrictive response)과 dc 전왜응답이 실제로 어떻게 변하는지를 보여주는 측정실험결과이다. 그림 2는 dc 바이어스 전계의 크기에 따른 ac 전왜응답으로 인가하는 dc 바이어스 전계에 따라 변형은 비교적 선형적이고, 이력이 약간 있으나 본 연구 이전의 PMN/PT계 재질의 결과에는

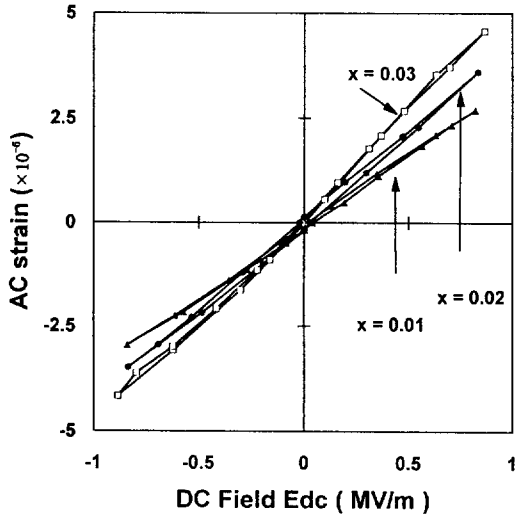


그림 2. AC electrostrictive response as a function of DC field for La 1% ($E_{\omega}=6.25$ kV/m, $f=6.68$ kHz), La 2% ($E_{\omega}=6.25$ kV/m, $f=1.69$ kHz), and La 3% ($E_{\omega}=6.57$ kV/m, $f=3.38$ kHz).

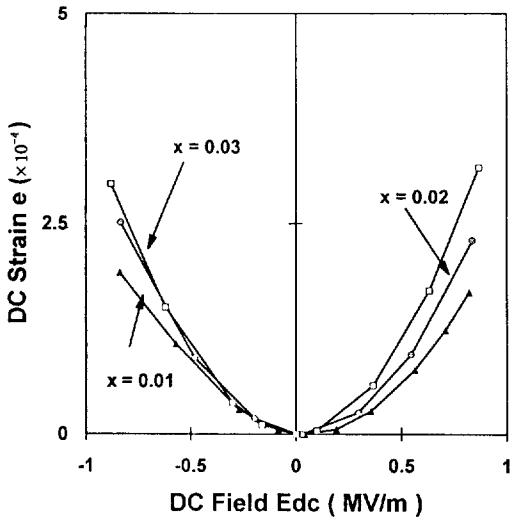


그림 3. DC electrostrictive response as a function of DC field for La 1% ($E_{\omega}=6.25$ kV/m, $f=6.68$ kHz), La 2% ($E_{\omega}=6.25$ kV/m, $f=1.69$ kHz), and La 3% ($E_{\omega}=6.57$ kV/m, $f=3.38$ kHz).

이력이 두드러지게 나타났다.^[5] La를 첨가함으로써 해서 이력이 현저히 줄어들음을 알 수 있다. 그림 3은 ac 전왜 응답 곡선으로부터 구한 전왜변환기의 dc 전왜응답으로 외부전계에 따라서 재료의 변형이 식 (1)처럼 비선형적으로 증가한다는 것을 말해주고 있다. 이들 특성곡선에

표 1. Electrostrictive coefficients for three different types of optical fiber electrostrictive transducers.

	PMN/PT (La1%)	PMN/PT (La2%)	PMN/PT (La3%)
$M(m/V)^2$	2.52×10^{-16}	3.35×10^{-16}	3.87×10^{-16}
	($f=6.68$ kHz)	($f=1.69$ kHz)	($f=3.38$ kHz)

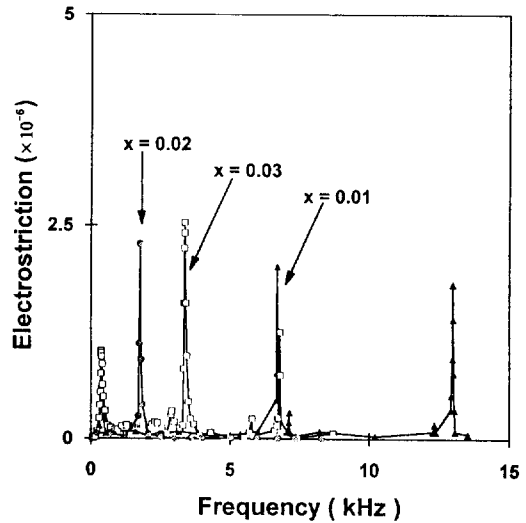


그림 4. Electrostriction as a function of frequency for La 1% ($E_{\omega}=6.25$ kV/m, $E_{dc}=0.45$ MV/m), La 2% ($E_{\omega}=6.25$ kV/m, $E_{dc}=0.45$ MV/m) and La 3% ($E_{\omega}=6.57$ kV/m, $E_{dc}=0.47$ MV/m).

해당하는 3가지 재료들의 전왜계수 M 값을 표 1에 나타내었다. La 3%가 $f=3.38$ kHz에서 가장 큰 값을 나타내었다.

전왜변환기를 광섬유 전계센서에 적용하기 위해서는 전왜변환기의 주파수 특성도 매우 중요하다. 동일 재료로 구성된 광섬유 전왜변환기에 대하여 인가된 전계신호의 주파수에 따른 전왜응답 특성실험 결과는 그림 4와 같다. La 1%는 주파수 6.68 kHz에서 La 2%는 1.69 kHz, La 3%는 3.38 kHz에서 최대응답을 보여주고 있다.

이렇게 구성된 광섬유 전계센서의 선형성을 조사하기 위해 dc 바이어스 전계를 La 1%는 0.45 MV/m, La 2%는 0.45 MV/m, La 3%는 0.47 MV/m에 고정시키고 각각 주파수 6.68 kHz, 1.69 kHz, 3.38 kHz인 ac 전계의 크기를 0.003 kVrms/m에서 35.3 kVrms/m까지 변화시켜가면서 광섬유 전계센서의 출력변화를 측정하는 것이 그림 5에 나타나 있다. 그림 5에서 보듯이 측정구간내에서의 선형성이 비교적 좋다는 것을 알 수 있다. 그림 2의 결과

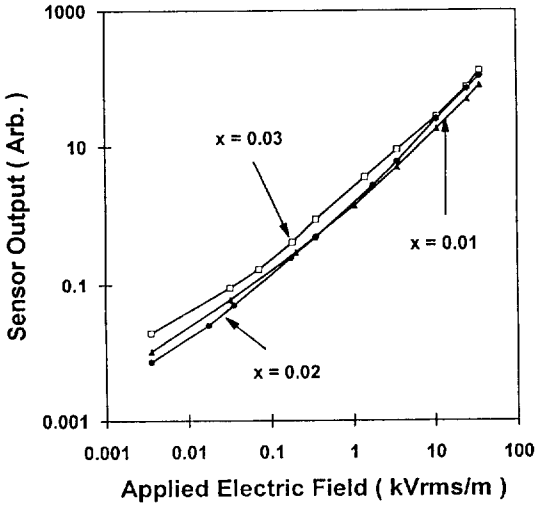


그림 5. Linear response of fiber optic sensor with input E-field for La 1% ($E_{dc}=0.45$ MV/m, $f=6.68$ kHz), La 2% ($E_{dc}=0.45$ MV/m, $f=1.69$ kHz), and La 3% ($E_{dc}=0.47$ MV/m, $f=3.38$ kHz).

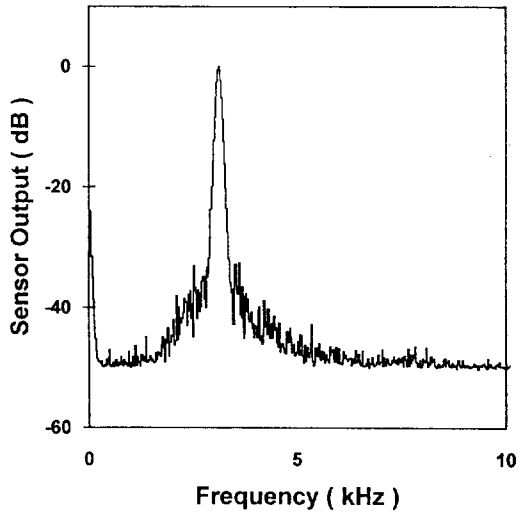


그림 7. Spectrum of the electric field sensor output from 0.1 kHz to 10 kHz measured in 100 Hz bandwidth.

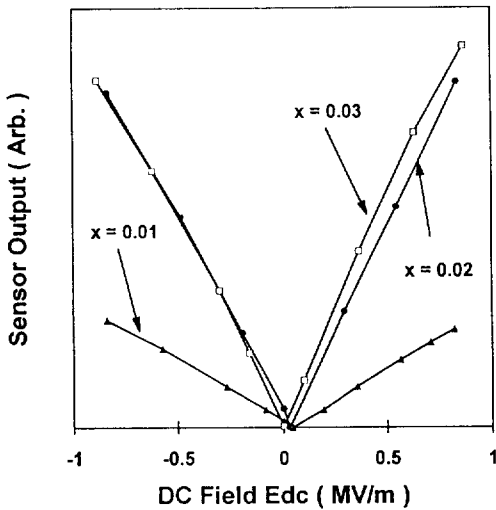


그림 6. Dependence of sensor output on the applied dc field for La 1% ($E_w=6.25$ kV/m, $f=6.68$ kHz), La 2% ($E_w=6.25$ kV/m, $f=1.69$ kHz), and La 3% ($E_w=6.57$ kV/m, $f=3.38$ kHz).

에서도 알 수 있듯이 전왜변환기의 ac 전왜응답이 dc 바이어스 전계의 크기에 비례하기 때문에 광섬유 전계 센서의 출력신호 또한 인가한 dc 바이어스 전계에 비례해야 한다. 그림 6은 dc 바이어스 전계가 증가함에 따라 주파수가 6.68 kHz(La 1%), 1.69 kHz(La 2%), 3.38 kHz(La 3%)이고, 크기가 각각 6.25 kV/m, 6.25 kV/m, 6.57

표 2. Various parameters for three optical fiber electric field sensors.

	$M(m/V)^2$	E_{min} (V/m)/ \sqrt{Hz}	f_p (kHz)	E_c (MV/m)
PMN/PT (La 1%)	2.52×10^{-16}	4.96	6.68	0.042
PMN/PT (La 2%)	3.35×10^{-16}	4.42	1.69	0.027
PMN/PT (La 3%)	3.87×10^{-16}	2.08	3.38	0.014

kV/m인 ac 전계신호에 대한 광섬유 전계센서의 출력이 증가함을 보여주고 있다.

최종적으로 광섬유 전계센서의 감도 또는 최소감지전계를 측정해 보았다. 그림 7은 La 3%의 출력신호를 스펙트럼 분석기를 통해서 resolution bandwidth를 100 Hz로 고정시켜 놓고 주파수를 0.1 kHz~10 kHz 사이에서 분석한 신호이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 신호대 잡음비가 50 dB이며 최소감지전계는 2.08 (V/m)/ \sqrt{Hz} 이다. 이때 변조주파수가 3.38 kHz, 크기가 6.57 kV/m인 전계신호를 감지부에 인가하였다.

PMN/PT 재질에 La이 첨가된 3개의 전왜재질을 사용한 광섬유 전계센서에 대한 전왜계수, 최소감지전계, 변환기의 공진주파수 그리고 전계센서의 출력값이 0이 되는 coercive field E_c 값들에 대한 측정실험 결과를 표

2에 나타내었다. 표 2의 M 과 E_c 값은 같은 실험을 여러번 반복 실험함으로써 얻어진 값으로써 정확도는 10% 이내이다.

IV. 결 론

전왜 특성이 우수한 것으로 알려진 0.9 PMN/ 0.1 PT 전왜재질에 La이 첨가된 조성비율이 다른 3개의 전왜 재질을 선택하여 광섬유 전왜변환기를 제작한 후 전왜 특성 실험을 수행하였다. 실험결과 La 3% 첨가된 재질의 전왜계수가 주파수 3.38 kHz에서 $3.87 \times 10^{-16}(\text{m}/\text{V})^2$ 으로 가장 크다는 것을 알았으며 dc 바이어스에 따라서 3개 재질 모두다 ac 전왜응답은 예상대로 선형적으로 증가함을 볼 수 있었고, 본 연구 이전의 PMN/PT계 재질에 비해 La을 첨가함으로써 해서 이력이 현저히 줄어들음을 알 수 있었다. 구성된 광섬유 전계센서에 대한 성능실험 결과로 입력 ac 신호에 대한 가변영역이 40 dB 이상에 걸쳐서 선형성이 비교적 우수하였다. 그리고 La 3%인 전왜변환기를 사용한 광섬유 전계센서의 최소감지전계는 주파수 3.38 kHz에서 $2.08 (\text{V}/\text{m})/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 가장 우수한 것으로 판명되었다.

참 고 문 헌

[1] M. Imai and H. Tanizawa, "Piezoelectric copolymer

jacketed single-mode fibers for electric-field sensor application," *J. Appl. Phys.*, **60**(6), 1916 (1985).
 [2] K. M. Bohnert and J. Nehry, "Fiber optic sensing of electric field components," *Applied Optics*, **27** (23), 4814 (1988).
 [3] S. T. Vohra, E. Bucholtz and A. D. Kersey, "Fiber-optic dc and low frequency electric-field sensor," *Optics Letters*, **17**(18), 1445 (1991).
 [4] S. T. Vohra and F. Bucholtz, "Fiber-optic ac electric-field sensor based on the electrostrictive effect," *Optics Letters*, **17**(5), 372 (1992).
 [5] 이경식, 강원석, 강현서, 정래성, 장현명, "광섬유 전왜 변환기를 이용한 간섭계형 광섬유 전계센서의 특성 분석", 전자공학회 6월 투고.
 [6] 김태용, 윤만순, 장현명, "La 첨가에 의한 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ 완화형 강유전체의 전왜 특성의 온도 의존성 개선", 한국 요업학회지, **32**(4), 498 (1995).
 [7] K. S. Lee, Y. S. Lee and S. J. Suh, "Magnetostrictive transducers for optical fiber magnetic field sensors", *Fiber Optic and Laser Sensor XII, SPIE* **2292**, 57 (1994).

Fiber optic interferometric electric field sensor with La-doped PMN/PT $[\text{0.9Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-0.1 PbTiO}_3]$ electrostrictive ceramics

W. S. Kang, Y. T. Lee, H. S. Kang, R. S. Jung and K. S. Lee
Department of Electronic Eng., Sung Kyun Kwan Univ., Suwon, 440-746, Korea

H. M. Jang
Department of Materials Science and Engineering, Pohang Univ. of Science and Technology, Pohang, 790-784, Korea

(Received: September 29, 1995)

We report a fiber optic interferometric electric field sensor that utilizes electrostrictive ceramics-1%, 2%, 3%, La-doped 0.9PMN/0.1PT, respectively-as the transducing elements. It is also experimentally observed that 3% La-doped PMN/PT among the three elements has the largest electrostrictive coefficient $M=3.87 \times 10^{-16}(\text{m}/\text{V})^2$ at 3.38 kHz and displays small hysteresis. The optical fiber sensor with the 3% La-doped PMN/PT exhibits minimum detectable field of $2.08(\text{V}/\text{m})/\sqrt{\text{Hz}}$ and has a good linearity over the dynamic range 40 dB.