

전기광학효과를 이용한 전계 프로브 센서

경운환 · 김건덕 · 어윤성 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과
 ① 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2009년 1월 16일 받음, 2009년 3월 6일 수정본 받음, 2009년 3월 13일 게재 확정)

본 논문에서는 전기광학효과를 갖는 LiNbO₃ 및 GaAs 물질 기반의 전계 프로브 센서를 제안하고 구현하였다. 이 센서를 이용하여 RF 링 공진필터 소자로부터 방사되는 수평 및 수직방향 성분의 필드세기를 측정하였다. 구현된 LiNbO₃ 및 GaAs센서로부터 계산된 감도는 각각 9.315 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 와 49.346 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 였으며, 신호 대 잡음비는 ~50 dB와 ~40 dB였다. 그리고 각 센서의 주파수 응답특성은 ~1.2 GHz였다. 마지막으로 센서를 이용하여 테스트 회로의 근접 필드 분포를 측정하였으며, 이는 HFSS 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.

주제어: 전기광학효과, 필드센서, 감도, 광섬유, LiNbO₃, GaAs

I. 서 론

각종 전자기기에서 발생하는 필드는 전자회로의 특성을 왜곡시키고, 무선통신 및 인체에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다.^[1] 이러한 필드의 영향을 효과적으로 분석하기 위해서는 전계 센서가 필요하며, 이러한 센서는 안테나 근접장 패턴 분포 조사 등에도 응용될 수 있다.^[2] 또한 이를 활용하여 고전압, 고전력 환경 하의 장비로부터 지속적으로 방출되는 필드 분포와 초소형 소자의 근접필드를 측정할 수 있다.^[3-5] 기존에는 센서 내부에 집적된 안테나에 의해 송수신된 신호의 특성을 통하여 필드가 감지된다. 이 경우에 안테나의 금속 성분 등이 필드 자체의 분포를 왜곡시키는 문제점이 있다.^[6] 이러한 문제점을 극복하기 위해서 금속이 아닌 전기광학효과를 갖는 물질을 이용하여 필드감지 센서가 구현되었다.^[7] 전기광학효과를 이용한 필드감지는 넓은 대역폭, 적은 침습성(invasiveness)과 고 분해능(spatial resolution) 등의 장점을 갖는다.^[8] 표 1에서 알 수 있듯이 일반적인 전기광학효과를 갖는 물질들은 고유의 굴절률, 전기광학계수, 유전상수, 격자구조를 갖는다. 감도가 우수한 센서를 구현하기 위해서는 전기광학계수가 커야 하는데, 이 경우에는 유전율도 커지는 경향이 있다. 한편, 유전율이 높은 물질을 센서팁으로 사

용하게 되면 측정대상 소자의 동작을 왜곡시키는 문제점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 표 1과 같이 전기광학 폴리머는 유전율을 최소화하고 기존의 물질보다 좀 더 전기광학효과를 높일 수 있는 대안물질로써 연구되고 있다. 하지만 물질 공정 시, 필드감지가 쉬운 구조로써 제작 되어져야 하는 어려움이 있고, 가격이 비쌀 뿐만 아니라 구하기가 어렵다. CdTe경우에는 내구성이 약해 물질가공 시 어려운점이 있다. 따라서 본 논문에서는 가격이 저렴하고, 물질가공이 용이한 전기광학효과 기반 LiNbO₃ 및 GaAs팁(tip)을 이용한 전계분포 측정용 프로브 센서를 구현하였다. 그리고 구현된 프로브 센서를 이용하여 마이크로스트립 링 공진 필터소자에서 발생하는 필드세기를 측정하였다.

II. 제안된 프로브 센서구조 및 동작원리

제안된 전기광학효과를 이용한 근접필드 측정용 프로브 센서 시스템과 핵심요소인 센서모듈의 구조가 그림 1(a)에 도시되어 있다. 특정 편광을 갖는 빔은 편광조절기와 써큘레이터(circulator)를 통하여 센서모듈에 전달되고, 센서모듈에 집적된 센서팁 즉, 전기광학 물질의 광진행경로를 진행한다. 이 때, 광의 진행방향으로 가해진 필드의 세기에 따라서 전기광

표 1. 전기광학효과를 갖는 물질의 종류 및 특성.

	GaAs	LiNbO ₃	CdTe	ZnTe	DAST	KTL	EO polymer
Dielectric constant (ϵ)	12.3	32	9.4	10.1	150	666	2.28
EO coefficient (γ)	1.43	$\gamma_{13} = 9.6$ $\gamma_{33} = 30.9$	6.8	4.3	160	600	10~60
Refractive Index (n)	3.43	$n_o = 2.286$ $n_e = 2.2$	2.84	2.98	$n_o = 2.4$ $n_e = 1.70$		1.3974
Wave length [nm]	1150	630	1300	780	820		660

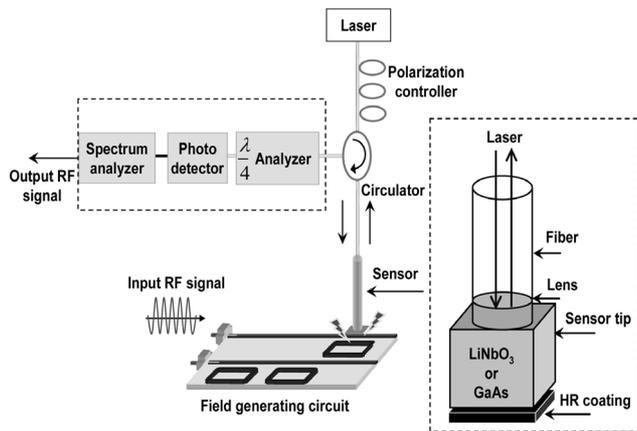
[†]E-mail: slee@kw.ac.kr

학효과를 나타내는 물질의 굴절률 변화는 $n(E) \approx n - \frac{1}{2} \gamma n^3 E$ 로 주어진다. 여기서, n 은 굴절률, E 는 물질에 가해진 전계세기, γ 는 전기광학계수를 의미한다. 또한 물질의 결정구조에 따라 측정 필드의 방향이 결정된다.^[9] 본 논문에서는 1550 nm 파장대역의 광원을 사용함과 동시에 높은 전기광학계수 (γ_{13} 과 γ_{33})를 사용하기 위하여 (100)방향의 LiNbO₃를 사용하였다. 이 LiNbO₃는 전기광학계수가 각각 $\gamma_{13} = 8.6$ pm/V와 $\gamma_{33} = 30.8$ pm/V이고, 굴절률 n_o 와 n_e 는 각각 2.208과 2.14이다. 또한, 이 물질의 전기광학효과는 물질 내의 광경로에 가해진 필드세기에 비례한다. 따라서 물질의 굴절률변화는 전계세기와 물질의 전기광학계수에 의해 결정된다. 필드에 의해서 유도된 굴절률 변화는 빔의 위상을 지연시키며, (100) LiNbO₃를 이용하여 센서를 구현하면 수평방향의 필드세기를 측정 가능하다.^[10] 다음으로 GaAs물질은 LiNbO₃와 달리 등방성 매질로써 모든 방향에 대해 동일한 굴절률을 갖는다. 따라서 물질의 결정구조에 관계없이 센서팁으로 사용이 가능하고, 전기광학계수는 모든 방향에 대해 동일한 $\gamma_{41} = 1.5$ pm/V이다. 결과적으로 (100)GaAs를 이용하여 센서를 구현하면 수직방향의 필드세기를 측정 가능하다. 자세한 프로브 센서의 동작원리가 그림 1(b)에 나타나 있다.^[11] 측정대상 전

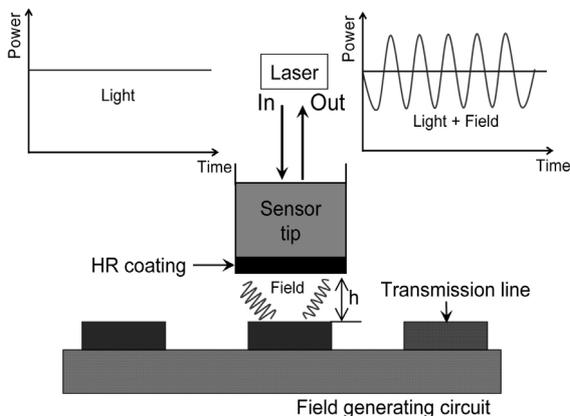
자소자에서 발생하는 필드가 센서팁에 가해지면 전기광학효과에 의해 물질의 굴절률이 변하게 되고, 여기에 진행되는 광의 위상이 변조된다. 이 변조된 빔은 반사필름에 의해 반사되어 광파이버로 다시 입사된 후, $\frac{\lambda}{4}$ 위상분석기를 통해 빔의 편광상태 변화를 조사함으로써 광세기를 통해 필드세기를 예측할 수 있다. 또 이 광신호는 광검출기(New focus, 모델: 1544 A)를 통해 전기신호로 변환되고, 최종적으로 광검출기에서 나온 전기신호를 스펙트럼 분석기(Advantest, 모델: R3271)를 이용하여 측정함으로써 필드분포를 구할 수 있다.

III. 제작된 필드 프로브 센서의 특성측정 및 결과

프로브 센서 모듈 제작과정에서 광손실이 존재하는 광파이버와 전기광학 물질의 경계 면에서 빔이 반사될 경우, 그림 2(a)에서처럼 평행빔 렌즈를 사용하지 않을 경우, 광파이버에서의 빔이 확산되기 때문에 반사되는 빔의 정확한 편광 방향을 유지하기가 어렵다. 경계 면에서 정확한 편광방향이 보장되지 않으면, 프로브 센서로서 감도특성이 떨어지는 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 빔의 편광방향이 잘 유지되도록 평행빔 렌즈를 사용하였다. 그림 2(b)와 같이 광파이버 코어 앞에 평행빔 렌즈를 집적하여, 안정된 반사편광을 얻을 수 있도록 하였다. 평행빔 렌즈를 집적하여 경계 면에서 반사되는 광 파워의 안정도를 파워미터를 통해 확인한 결과는 그림 2(c)와 같다. 즉 50분 동안 반사된 광파워를 관찰한 결과 약 0.2 dB의 광 안정도를 얻었으며, 이로써 반사된 빔의 편광 역시 잘 유지되었다. 둘째로 평행빔 렌즈가 집적된 광섬유 코어와 $400 \times 400 \times 450 \mu\text{m}^3$ 크기를 갖는 전기광학 물

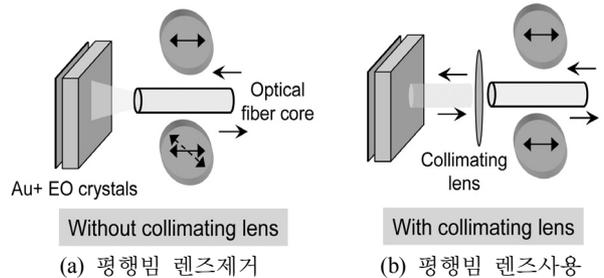


(a) 전체 센서시스템 및 모듈구조



(b) 동작원리

그림 1. 필드 프로브 센서 구조.

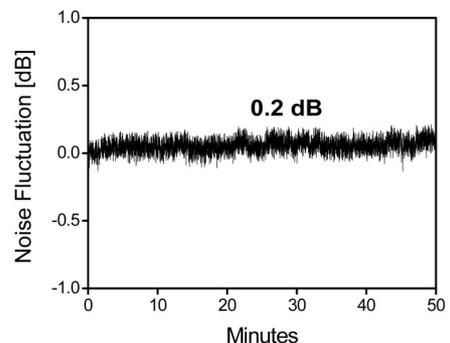


Without collimating lens

With collimating lens

(a) 평행빔 렌즈제거

(b) 평행빔 렌즈사용



(c) 측정된 광 반사파워의 안정도

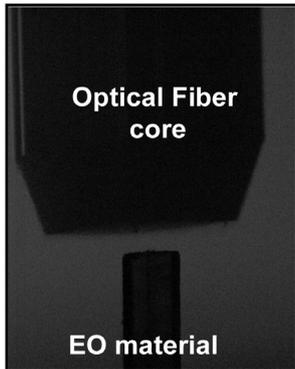
그림 2. 센서팁에서 안정된 반사편광.

질과의 정렬을 위해 컴퓨터 제어 시스템을 이용하였다. 그림 3(a)는 컴퓨터 카메라로 확대시킨 정렬사진이다. 여기서 사용된 전기광학 물질 LiNbO_3 와 GaAs (MTI 제품)는 한쪽 면에 반사가 잘 일어나도록 금을 1000 \AA 의 두께로 증착하였다. 평행빔 렌즈가 집적된 광섬유 코어와 전기광학 물질의 경계면에서 광손실 없이 안정된 빔의 반사편광을 얻을 수 있도록 에폭시를 사용하여 접착함으로써 프로브 센서 모듈을 제작하였으며 그림 3(b)와 같다.

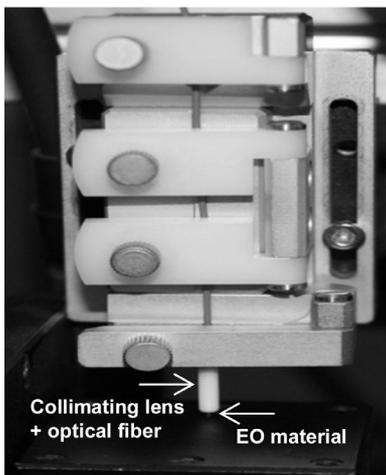
본 논문에서는 그림 4(a)에 있는 링 공진필터 소자를 사용하여 필드를 생성하였다.^[12] 소자의 크기는 $60 \times 50 \text{ mm}^2$ 이고 회로선로의 두께는 1 mm 이다. HFSS 시뮬레이터를 이용하여 1 GHz 주 파수 대역에서 계산된 전계 및 자계분포가 각각 그림 4(b)와 4(c)에 나타나 있다. 회로의 동작특성에 가장 민감하게 영향을 미치는 선로 사이 영역에서 필드가 상대적으로 강함을 알 수 있다. 따라서 이 부분을 중점으로 필드세기를 측정하였다.

본 실험에서는 1550 nm 파장대역(M-tech, 모델: MSLD-3)의 광원을 광증폭기(Licomm com.)을 이용하여 32 mW 의 광 파워로 증폭시켰다. 이를 광파이버(단일모드 파이버)에 입사시켜 편광조절기를 통해 센서팁까지 0° 의 선편광을 유지시

켜주었다. 여기서 광파이버 내에 유지되는 편광방향 및 필터 소자에서 발생하는 필드세기에 따라서 반사되는 편광의 변화는 편광합성기(General Photonics, 모델: PSY-101)를 통해 조사되었고, 그림 1(a)에서처럼 $\frac{\lambda}{4}$ 위상분석기를 이용하여 분석되었다. 편광조절기와 필드분석시스템 사이의 전체 광손실은 약 10 dB 였다. 편광조절기에서 약 2 dB , 서큘레이터에서 약 2.6 dB 와 프로브센서부분에서 약 5.4 dB 로 실질적으로 광검출기에 나타나는 평균전류는 약 60 mA 였다. 필터소자에서 발생하는 필드의 세기를 측정하여 얻은 센서의 전달특성은 그림 5에 나타나 있다. 측정 시, 필터소자에 1 GHz 주파수 신호를 인가하였고, 프로브 센서와 소자와의 거리는 $3 \mu\text{m}$ 였다. 센서팁의 감도는 1 Hz 당 측정 가능한 최소 전압으로 정의되며, 공진필터에서 발생하는 필드의 세기를 측정하여

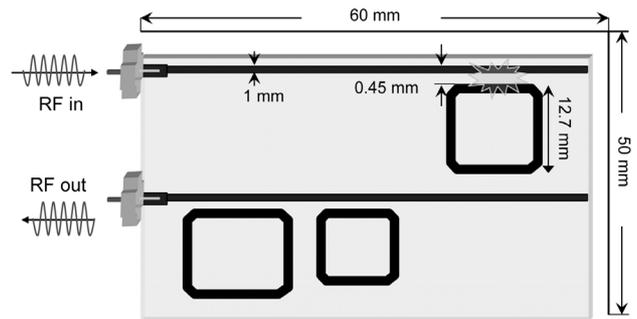


(a) 정렬 확대사진

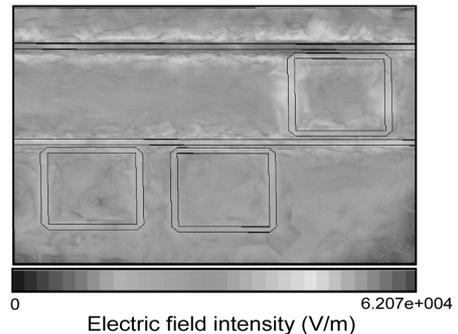


(b) 제작된 필드 프로브 센서

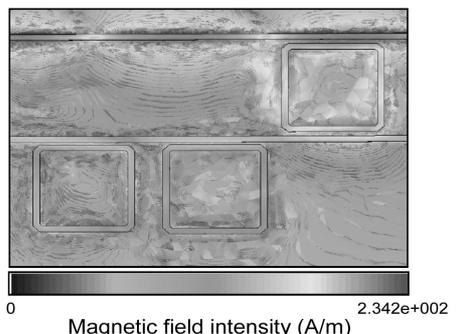
그림 3. 컴퓨터 제어시스템을 이용한 전기광학 물질과 광파이버 코어와의 정렬.



(a) 소자 구조



(b) 계산된 전계분포



(c) 계산된 자계분포

그림 4. 필드생성을 위한 RF 링 공진필터 소자.

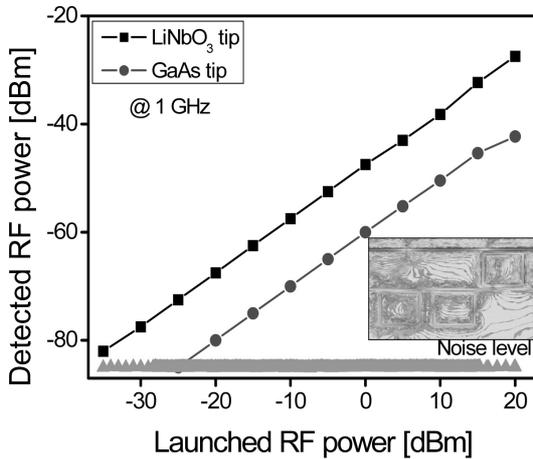


그림 5. 제작된 센서의 전달특성 신호.

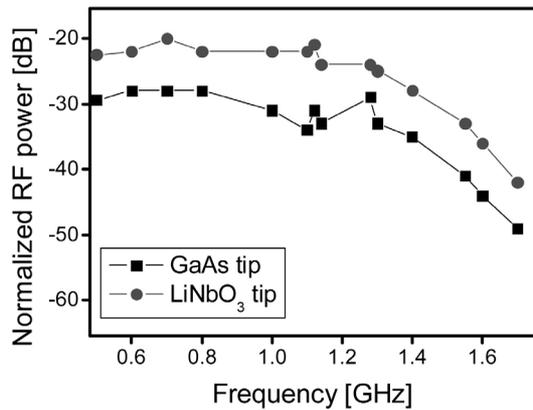
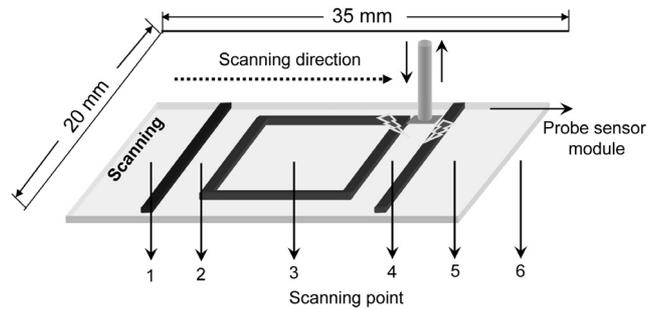


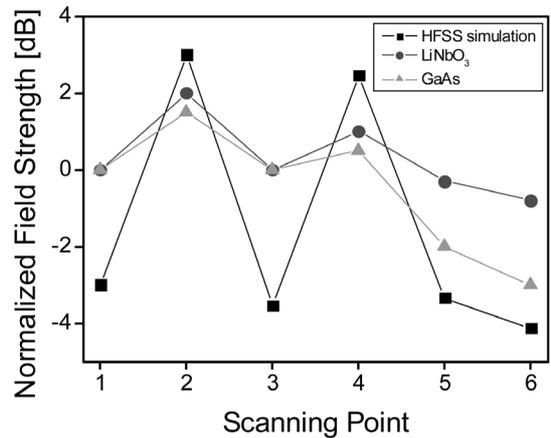
그림 6. 센서의 응답특성.

얻어진다. 센싱 영역에서 특정 격자구조를 갖는 물질에 높은 전기광학효과를 갖도록 광진행경로에서 특정 빔의 편광방향을 유지함으로써 필드세기를 측정하였다. 측정된 LiNbO₃와 GaAs 프로브센서의 감도는 각각 $9.315 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 와 $49.346 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 였으며, 신호 대 잡음 비는 각각 ~50 dB와 ~40 dB였다. 이 감도 간의 차이는 주로 전기광학계수의 차이와 필드 방향 차이에 기인한다. 하지만 LiNbO₃가 집적된 센서의 경우 높은 전기광학계수로 감도는 더 높지만, 유전율이 크기 때문에 센서가 측정대상 소자에 미치는 영향이 더 큰 단점이 있다.

두 센서팁 LiNbO₃ 및 GaAs가 집적된 프로브 센서를 이용하여 필터소자로부터 측정된 센서의 응답특성은 그림 6과 같다. 즉, 제작된 두 프로브 센서의 응답특성은 ~1.2 GHz임을 확인하였다. 역시 LiNbO₃팁이 같은 실험조건에서 GaAs팁보다 신호 대 잡음 비가 ~10 dB우수하였으며, 이는 전기광학계수의 차이와 필드 방향차이에 기인한다. 물질의 동작 주파수 특성이 ~1.2 GHz인 이유는 1 m이상의 광섬유 내에서 진행되는 편광의 방향이 휘어진 부분에서는 약간의 오차를 가지고 이동하기 때문에 광섬유 내에서 정확한 편광유지가 어렵기 때문이다. 즉, 센싱 영역에서의 빔의 편광방향과



(a) 필터소자상의 필드스캔



(b) 측정된 필드분포

그림 7. 필드 프로브 센서를 이용한 필드분포측정.

물질의 축이 평행하게 되면 감도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 따라서 감도를 향상시키기 위해서는 광섬유 내에 정확한 편광유지가 필요하다.^[13] 마지막으로 그림 7(a)에서 알 수 있듯이 제작된 프로브 센서를 이용하여 필터 소자의 일부 영역의 전계분포를 화살표가 나타내는 방향을 따라 측정하였다. 소자 표면으로부터 약 3 μm 떨어진 높이에서 측정하였으며, 이 때 필터소자의 입력포트에 인가된 신호의 주파수와 파워는 각각 1 GHz와 20 dBm였다. 필터소자의 위치에 따른 상대적인 필드세기 분포에 대한 이론적 계산 및 측정 결과가 그림 7(b)에 나타나 있다. 특히, 필드세기가 강한 선로 사이의 필드분포를 효과적으로 측정할 수 있었으며, 이론 및 실험결과가 적절히 일치함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전기광학효과를 이용한 필드 측정용 프로브 센서를 구현하였다. 구현된 프로브 센서를 이용하여 필터소자에서 발생하는 필드를 측정된 결과, 필터소자의 선로 사이의 필드분포를 효과적으로 측정할 수 있었으며, 이는 HFSS 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다. 즉, 회로기판에서 발생하는 근접필드 분포를 제작된 필드 프로브 센서를 통하여 국부적으로 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-D00195-I01041).

참고문헌

- [1] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, and E. Piuze, "Specific absorption rate and temperature increases in the head of a cellular-phone user," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 34, no. 7, pp. 1118-1126, 2000.
- [2] E. Bonek, D. Hornbachner, E. Riedl-Bratengeyer, W. Hardrian, and R. Jobst, "Electro-optic ELF field sensor," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 21, pp. 1994-1995, 1992.
- [3] K. Yang, L. P. B. Katehi, and J. F. Whitaker, "Electro-optic field mapping system utilizing external gallium arsenide probes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 4, pp. 486-488, 2000.
- [4] M. Shinagawa and T. Nagatsuma, "Electro-optic sampling using an external GaAs probe tip," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 17, pp. 1341-1343, 1990.
- [5] B. Kolner and D. Bloom, "Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 1, pp. 79-93, 1986.
- [6] S. H. Zainud-Deen, M. E. S. Badr, E. El-Deen, K. H. Awadalla, and H. A. Sharshar, "Microstrip antenna with defected ground plane structure as a sensor for landmines detection," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 4, pp. 27-39, 2008.
- [7] S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, E. Yamazaki, M. Kishi, and M. Tsuchiya, "Fiber-edge electrooptic/magneto-optic probe for spectral-domain analysis of electromagnetic field," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2611-2616, 2000.
- [8] H. Togo, N. Shimizu, and T. Nagatsuma, "Tip-on-fiber electro-optic probe for near-field measurement," *NTT Tech. Rev.*, vol. 4, no. 1, pp. 12-20, 2006.
- [9] W. K. Kuo, W. H. Chen, Y. T. Huang, and S. L. Huang, "Two-dimensional electric-field vector measurement by a LiTaO₃ electro-optic probe tip," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 27, pp. 4985-4993, 2000.
- [10] K. Yang, G. David, S. Robertson, J. F. Whitaker, and L. P. B. Katehi, "High-resolution electro-optic mapping of near-field distributions in integrated microwave circuits," *IEEE MTT-S Digest*, vol. 2, no. 2, pp. 949-952, 1998.
- [11] M. Iwanami, S. Hoshino, M. Kishi, and M. Tsuchiya, "Wideband magneto-optic probe with 10 μm -class spatial resolution," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 4B, pp. 2288-2292, 2004.
- [12] U. H. Kyoung, G. D. Kim, S. S. Lee, and Y. S. Eo, "Microstrip ring resonator filter enabling enhanced sideband suppression," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 50, no. 11, pp. 2866-2869, 2008.
- [13] S. Wakana, E. Yamazaki, S. Mitani, H. Park, M. Iwanami, S. Hoshino, M. Kishi, and M. Tsuchiya, "Performance evaluation of fiber-edge magneto-optic probe," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 12, pp. 3292-3299, 2003.

Field Probe Sensor Based on the Electro-Optic Effect

Un-Hwan Kyoung, Gun-Duk Kim, Yun-Seong Eo, and Sang-Shin Lee[†]

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

[†]E-mail: slee@kw.ac.kr

(Received January 16, 2009; Revised manuscript March 6, 2009; Accepted March 13, 2009)

A compact electric field probe sensor incorporating two different electro-optic materials of LiNbO₃ and GaAs was proposed and fabricated, and it was used to measure the strength of the horizontal and vertical fields generated by a microstrip ring-resonator filter. The sensitivities of the sensors in LiNbO₃ and GaAs were $9.315 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ and $\sim 49.346 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ respectively, and their signal to noise ratios were approximately ~ 50 dB and ~ 40 dB respectively. And the operating frequency range was up to ~ 1.2 GHz. The electric field profile for the test circuit was scanned and found to be in good agreement with that obtained by using the HFSS simulation.

OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (160.2100) Electro-optical materials; (160.4330) Nonlinear optical materials; (130.6010) Sensor