

논문 2007-44SD-3-4

LiNbO₃ 기판의 도메인 반전 특성과 이를 이용한 기능성 광변조기의 제작

(Characteristic of LiNbO₃ Domain Inversion and Fabrication of
Electrooptic Device Application using Domain Reversal)

정우진*, 김우경**, 양우석**, 이형만**, 권순우***, 송명근***, 이한영**

(W. J. Jeong, W. K. Kim, W. S. Yang, H. M. Lee, S. W. Kwon, M. K. Song, and H. Y. Lee)

요약

본 논문에서는 LiNbO₃의 선택적 영역을 도메인 반전을 수행하였으며, 이를 대역변조기 및 SSB 광변조기 제작에 응용하였다. 인가전압에 대한 회로적인 응답전류를 분석 및 고려함으로써 도메인 벽의 이동속도를 정확히 제어할 수 있었다. 과도한 도메인 벽 이동속도에 의한 도메인 반전 형상을 확인하였고, 또한 도메인 벽의 진행방향에 따라 그 속도의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 제작된 대역변조기는 30.3 GHz를 중심주파수로 하여 5.1GHz의 3dB 대역폭을 보였고, SSB 광변조기의 변조 스펙트럼으로부터 19dBm의 5.8GHz RF 입력신호에 대해 USB가 LSB에 비해 33dB정도 억제됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

The periodic domain-inversion in the selective areas of Ti:LiNbO₃ Mach-Zender waveguides was performed and band-pass modulators and single sideband (SSB) modulators were fabricated by using domain-reversal. The domain wall velocity was precisely controlled by real-time analysis of a poling-induced response current under an applied voltage. The domain wall velocity was significantly affected by the crystal orientation of the domain wall propagation, which influenced the final domain geometry. In a certain case, the decomposition of LiNbO₃ crystal was observed, for example, under the condition of too fast domain wall propagation. The fabricated band-pass modulator with a periodic domain-inversion structure showed the maximum modulation efficiency at 30.3 GHz with 5.1 GHz 3dB-bandwidth, and SSB modulator was measured to show 33 dB USB suppression over LSB at 5.8 GHz RF.

Keywords : domain-inversion, domain wall velocity, optical modulator, LiNbO₃

I. 서론

LiNbO₃는 높은 전기광학 계수를 갖는 강유전체로 광변조기와 같은 광통신용 소자의 제작에 주로 활용되어 왔다. 또한 고유의 높은 비선형계수로 인해 Second

Harmonic Generation(SHG)이나 Optical Parametric Oscillators(OPO's)와 같은 파장 변환의 구현에도 많이 사용되었다. 벌크 LiNbO₃를 이용한 파장변환 시 발생하는 walk-off 효과를 극복하고 변환효율을 극대화하기 위해 Periodically Poled Lithium Niobate(PPLN)를 이용한 Quasi-Phase Matching(QPM) 방식이 도입되었으며, 이에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다^[1,2]. 그러나 최근 도메인 반전구조를 갖는 대역 광변조기나 Single Sideband(SSB) 광변조기가 제안되면서, 전기광학을 이용한 광소자로의 응용에도 도메인반전 기술이 주목받고 있다^[3,4,5]. 비선형 응용을 위한 주기적인 도메인 반전과 달리, 광변조기에서는 그 생산성 향상을 위

* 정희원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
(School of Electrical and Computer Eng.,
University of Seoul)

** 정희원, 전자부품연구원
(KETI)

*** 정희원, 한국항공대학교 항공재료공학과
(Department of Materials Eng., Hankuk Aviation
University)

접수일자: 2006년12월28일, 수정완료일: 2007년2월2일

해 도메인 반전이 웨이퍼 단위에서 국부적인 영역에 한해 수행되어야 한다. 또한 광변조기는 마흐젠더 간섭기를 이용하므로 도메인 반전된 영역이 인접한 도파로를 침범하지 않도록 도메인 벽의 이동속도를 정확히 제어하여야 한다.

본 논문에서는 LiNbO₃의 선택적 영역을 도메인 반전하였으며, 이를 대역변조기 및 SSB 광변조기 제작에 응용하였다. 과도한 도메인 벽 이동속도에 의한 도메인 반전 형상을 분석하고, 이의 정확한 제어를 위한 방안을 고안하였다. 또한 실험 결과로부터 도메인 벽의 진행방향에 따라 그 속도의 차이가 발생함을 확인하였다. 웨이퍼 단위의 도메인 반전 시 발생하는 회로의 응답전류를 분석하였고, 도메인 벽의 이동속도를 정확히 제어함으로써 대역 광변조기 제작을 위한 효율적인 도메인 반전시스템을 구축할 수 있었다.

II. 도메인 반전을 이용한 대역 광변조기

진행파형 광변조기에서, 도파광과 RF간의 위상속도 부정합은 고주파에서의 변조 효율을 저하시켜 광대역 변조를 제약하는 주요 원인이다. 그러나 광도파로 영역의 주기적인 도메인 반전은 도파광과 RF 간의 Quasi-Velocity Matching(QVM)을 유발하며, 특정한 주파수 대역에서의 효율적인 변조를 가능하게 한다^[3].

그림 1은 본 논문에서 사용된 도메인 반전 구조를 갖는 Mach-Zehnder 간섭기로서, 각각 30GHz 대역 광변조기와 5.5GHz 대역 SSB 광변조기의 제작에 활용되었다. 대역 광변조기용 광도파로는 주기 $2\Lambda_{BP}=6.2\text{mm}$ 를 갖고 상·하 도파로가 교번으로 도메인 반전되어 있으며, 최종 도메인 반전 영역을 길게 하여 DC 바이어스 동작을 가능하게 하였다. SSB 광변조기용 광도파로는 마흐

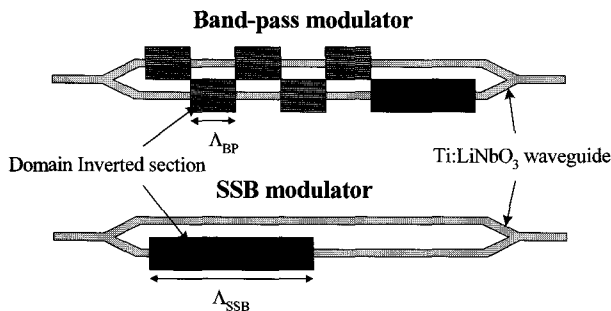


그림 1. 대역 변조기 및 SSB 변조기용 도메인 반전된 광도파로의 개략도

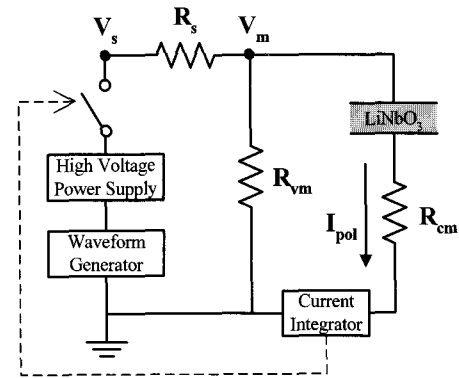
Fig. 1. Schematic diagram of domain-inverted optical waveguides for band-pass and SSB modulator.

젠더 하부도파로의 절반 영역($\Lambda_{SSB}=16.9\text{mm}$)이 도메인 반전된 구조를 취함으로써, 상·하부 도파광이 90° 위상차를 갖는 신호에 의해 변조를 수행하도록 하였다^[4,5].

본 논문에서는, 3인치 z-cut LiNbO₃ 웨이퍼에 그림 1과 같이 국부적인 도메인 반전영역을 갖는 마흐젠더 간섭기를 나열하여 제작하였다.

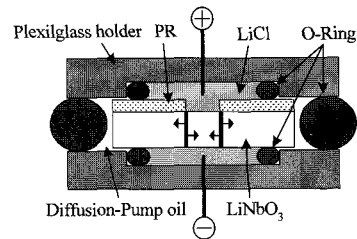
III. 회로 구성이 도메인 반전 특성에 미치는 영향

LiNbO₃ 기판에 Ti를 확산시켜 광도파로를 제작하였다. 고온 확산과정 중에 발생한 +z면의 마이크로 도메인을 제거하기 위해 도파로 뒷면을 연마하였다. 연마된 기판의 전면은 도메인반전한 후, 도파로 상부에 감광액



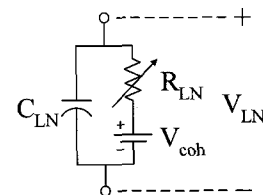
(a) 도메인 반전 시스템 개략도

(a) Schematic diagram for domain inversion system



(b) 지그

(b) Zig for poling



(c) LiNbO₃ 등가회로

(c) Equivalent circuit of LiNbO₃

그림 2. 도메인 반전 시스템과 LiNbO₃ 등가회로

Fig. 2. Domain inversion system and equivalent circuit of LiNbO₃.

패턴을 형성하여 선택적인 영역에 한해 도메인 반전을 수행하였다. 그림 2는 도메인 반전을 위한 시스템과 도메인 반전시 나타나는 LiNbO₃의 전기적 특성을 등가적으로 표현한 것이다.

포토레지스트 패턴이 형성된 결정에 외부전압을 인가하기 위해 결정과 전극사이에 LiCl 전해용액을 주입하였으며, 그 형태는 그림 2(b)와 같다. 또한 고무오링을 이용하여 전해용액의 방출을 막고 실리콘 오일을 사용하여 인가된 전압에 대한 누설 전류를 억제하였다. 그림 2(a)와 같은 시스템을 사용하여 LiNbO₃ 기판에 문턱 전압 이상의 전압을 인가하면, 강한 전계가 포토레지스트 가장자리에 발생하여 핵생성이 유발된다. 이렇게 발생된 도메인 벽은 좌·우로 진행하여 도메인 반전 영역을 넓힌다^[6]. 이러한 도메인 반전은 전류의 흐름으로 나타나며, 도메인 반전 시 나타내는 LiNbO₃의 전기적 특성은 그림 2(c)의 회로와 같이 근사적으로 모델링할 수 있다. V_{LN}이 문턱전압이하일 때 LiNbO₃는 절연 특성을 보이므로, 가변저항 R_{LN}은 매우 커서 회로를 단락시킨다. 그러나 이 가변저항은 도메인 반전이 발생하면서 급속히 작아지며 그 값은 기판에 인가되는 전계가 강할수록, LiCl에 노출된 영역의 면적이 클수록 증가한다. 따라서 도메인 반전이 활발히 진행될 시 LiNbO₃는 정전압원의 특성을 보이며, 그 값 V_{coh}는 21kV/mm로 알려진 cohesive field에 의해 지배받는다. C_{LN}은 LiCl 용액을 사용하여 LiNbO₃ 기판을 상하로 대전시킴으로써 발생한 캐패시턴스로, 고무오링으로 밀폐된 면적에 비례하므로 웨이퍼 단위의 도메인 반전 시 큰 값을 나타낸다.

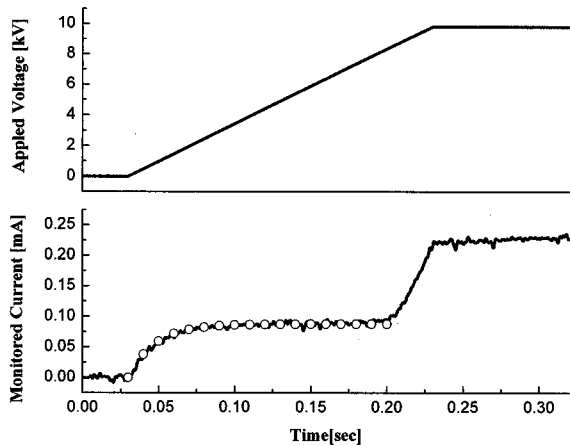
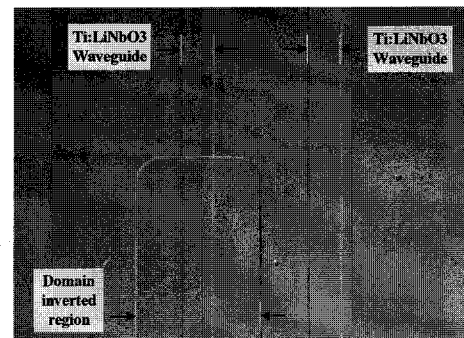


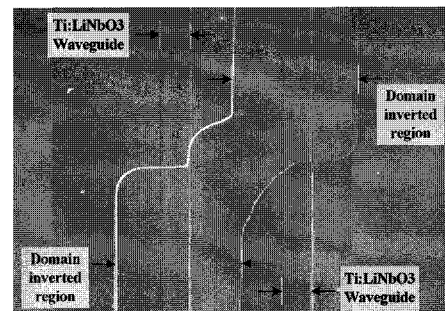
그림 3. 도메인 반전시 인가전압 및 측정된 전류
Fig. 3. Applied voltage and monitored current during poling.

도메인 반전 실험에 사용된 저항 R_s, R_{vm}, R_{cm}은 각각 10MΩ, 100MΩ, 1kΩ이며, Current integrator에서 계산된 총 이동 전하량을 도메인 반전된 면적으로 환산하여 목표한 값에 이르렀을 때 power supply를 회로로부터 차단하였다. 그림 3은 도메인 반전에 사용된 인가전압 및 측정된 전류의 곡선이다. 특이한 점은 핵생성을 위한 문턱전압에 이르지 않은 시점에서 측정된 전류가 일정한 시정수를 갖고 증가하는 응답을 보였다는 것이다. 이러한 결과는 도메인 반전과는 무관한 것으로, 인가전압에 대한 LiNbO₃의 회로적인 응답이다.

각각의 저항의 관계가 R_{vm} ≫ R_s ≫ R_{cm} 이라 가정하면, 기울기 U를 갖고 증가하는 ramp 함수에 대한 시간 t에 따른 응답 전류 I_{pol} = U · C_{LN}(1 - e^{-t/C_{LN}R_s})이다. 고무오링으로 밀폐된 영역의 면적이 28cm²이고, 인가전압의 기울기 U=50kV/sec임을 감안하면 곡선의 시정수는 17.5ms이며, 계산된 응답 곡선은 그림 3에 원모양의 점으로 도시하였다. 그림으로부터 실험결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 상기와 같은 이유로 LiNbO₃를 통과한 총 전하량 중에서 도메인 반전에 기여한 전하량은 2/3정도로 추정되며, 도메인 반전된 형상을 관찰한 결



(a) 시작지점
(a) Starting section



(b) 교차지점
(b) Intersecting section

그림 4. 도메인 반전된 도파로 형상
Fig. 4. Image of domain-inverted waveguides.

과에서도 상당영역이 반전되지 않을 것을 확인할 수 있었다.

이러한 회로응답전류를 감안하여 도메인 반전이 수행되었으며, 그림 4는 도메인 반전된 도파로 형상을 보여주고 있다.

그림 4(a)는 SSB 광변조기용 도파로이며, 마흐젠더의 한쪽 도파로만 정확히 도메인 반전된 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 DSB 광변조기용 도파로에서 도메인 반전이 교차하는 영역을 관찰한 것이다.

비선형 응용을 위한 LiNbO₃의 도메인 반전 결과에서는 회로응답전류를 관찰할 수 없다. 그러나 이는 대부분 조각 단위의 샘플이 사용되어 C_{LN}이 작기 때문이며, 도메인이 반전되는 영역의 총 면적이 크기 때문에 회로응답전류가 실험결과에 미치는 영향이 미미하다.

IV. 도메인 벽의 이동방향과 그 속도

과장변환을 위한 PPLN과 본 논문의 대역광변조기의 동시제작을 위한 도메인 반전 패턴을 형성하였으며, 그림 5는 이러한 패턴의 모습을 개략적으로 보여주고 있다. 웨이퍼 상부의 도메인 반전 패턴은 도파로의 진행방향과 직교하는 방향으로, 하부의 패턴은 그림 1과 같이 도파로와 수평한 방향으로 형성되었다. 3인치 웨이퍼에 패턴을 수립한 후, 그림 2와 같은 시스템을 사용하여 도메인 반전을 수행하였다.

그림 6(a)와 6(c)는 PPLN용 패턴, 그림 6(b)와 6(d)는 변조기용 패턴을 각각 진행방향만 다르게 하여 도메인 반전한 결과이다. 도메인 반전시 도메인 반전속도는 그 진행방향에 의존하며, x축 보다는 y축, +y축 보다는 -y축이 더 빠름을 확인하였다^[7]. 그림 6(b)와 6(c)로부터 -y축 방향으로 LiNbO₃의 결정구조가 깨어진 부분을

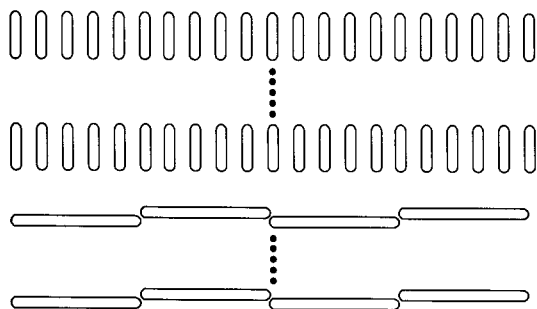


그림 5. 도메인 방향에 따른 이동속도 실험을 위한 패턴

Fig. 5. Patterns for the test of wall velocity due to domain direction.

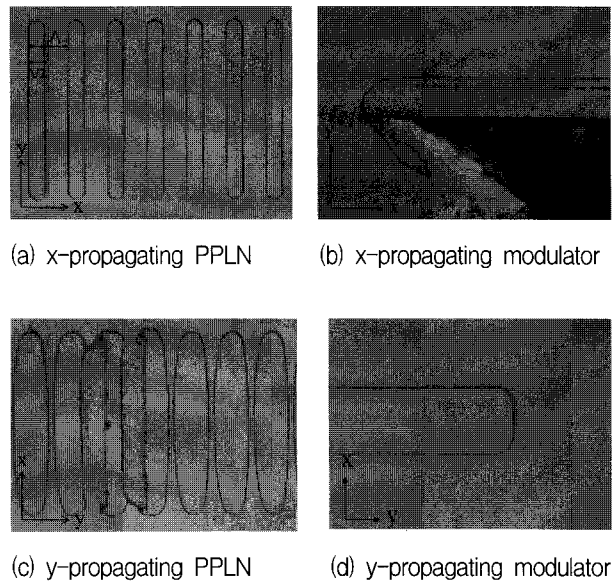


그림 6. 도메인 벽의 진행방향에 따른 반전 형상

Fig. 6. Domain-inverted image by the domain wall propagation.

확인할 수 있다. 이는 -y 방향으로의 도메인 반전이 급속히 전개되면서, 즉 도메인 반전에 기인한 전류가 순간적으로 커지면서 발생한 결과이다^[8]. 그림 6(d)는 도메인 벽의 이동속도와 인가전압을 적절히 조절함으로써 얻어진 최적화된 도메인 반전 결과를 도시화한 것이다.

V. 광변조기 제작 및 특성 평가

도메인 반전된 도파로 위에 450nm 두께의 SiO₂ 층을 형성하고 Ti, Au를 200nm 증착한 후, 도금공정을 사용하여 4μm 두께의 전극을 탑재하였다. 제작된 전극의 너비 W와 간격 S는 각각 38μm, 50μm이다. 30GHz 대역 광변조기를 위한 도메인 반전 영역의 길이 $A_{BP}=3.1mm$ 로, 5.5GHz 대역 SSB 광변조기에서의 길이 $A_{SSB}=8.45mm$ 로 하였다.

그림 7은 제작된 광변조기에서 RF 입·출력 영역을 보여주고 있다. 도메인 반전된 영역을 확인하기 위해 LiNbO₃ 식각용액(HF:HNO₃=1:2)에 약 15분 동안 식각한 후 전극을 탑재한 것으로 실제 제작된 광변조기에서는 도메인 반전된 영역을 확인할 수 없다. 그림으로부터 정확히 마흐젠더의 한쪽 도파로만 도메인 반전이 수행되었고 중앙전극의 하부에 두 도파로가 모두 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 공정을 통해서 마흐젠더 두 도파로의 대칭적인 변조수행을 가능하게 하였으며, 각각 제작된 광변조기의 특성을 측정된 결과가 그

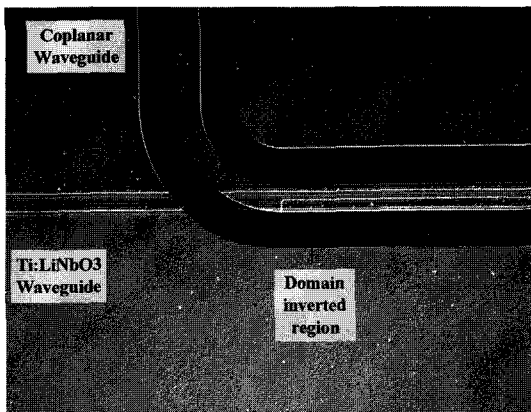
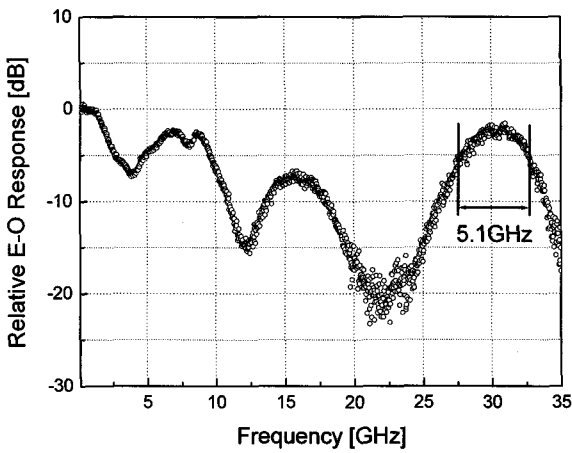
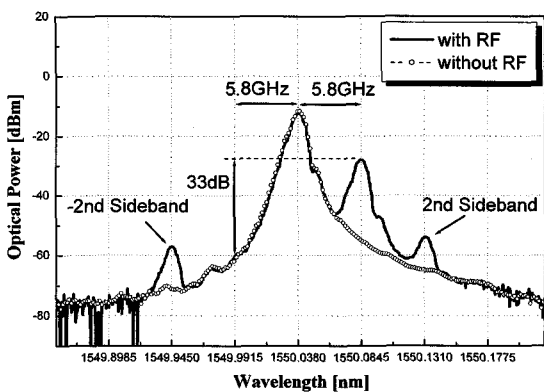


그림 7. 제작된 광변조기
Fig. 7. Fabricated optical modulator.



(a) 30GHz 대역광변조기의 주파수 응답특성
(a) E-O response of 30 GHz band-pass optical modulator



(b) SSB 광변조 스펙트럼
(b) SSB modulated optical spectrum

그림 8. 제작된 광변조기의 변조특성
Fig. 8. Characteristic of the fabricated modulator.

림 8에 도시되어 있다.

그림 8(a)는 제작된 대역광변조기의 주파수 응답특성으로, 30.3 GHz를 중심주파수로 하여 5.1GHz의 3dB 대

역폭을 보이고 있다. 그림 8(b)는 SSB광변조기의 변조 스펙트럼으로 19dBm의 5.8GHz RF 입력신호에 대해 USB가 LSB에 비해 33dB정도 억제되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 LiNbO₃의 선택적 영역을 도메인 반전 하였으며, 이를 대역변조기 및 SSB 광변조기 제작에 응용하였다. 웨이퍼 단위의 도메인 반전시 인가전압에 대한 회로적인 응답전류를 분석하고 이를 고려한 도메인 반전 시스템을 구축함으로써 도메인 벽의 이동속도를 정확히 제어할 수 있었다. 실험 결과로부터 과도한 도메인의 벽 이동속도에 의한 도메인 반전 형상을 확인하였고, 또한 도메인 벽의 진행방향에 따라 그 속도의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

이와 같은 실험을 통해 기능성 광변조기를 제작할 수 있었다. 제작된 대역변조기는 30.3 GHz를 중심주파수로 하여 5.1GHz의 3dB 대역폭을 보였고, SSB광변조기의 변조 스펙트럼으로부터 19dBm의 5.8GHz RF 입력신호에 대해 USB가 LSB에 비해 33dB정도 억제됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Zhu and N. Ming, "Second-Harmonic Generation in a Fibonacci Optical Superlattice and the Dispersive Effect of the Refractive Index," *Phys. Rev. B*, vol. 42, pp. 3676-3679, 1990.
- [2] L. E. Myers and W. R. Bosenberg, "Periodically Poled Lithium Niobate and Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillator in Periodically Poled LiNbO₃," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, pp. 1663-1672, 1997.
- [3] W. Wang, R. Tavlykaev, and R. V. Ramaswamy, "Bandpass traveling-wave Mach-Zehnder modulator in LiNbO₃ with domain reversal," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 610-612, May 1997.
- [4] H. Murata and S. Yamamoto, "Novel guided-Wave electrooptic single-sideband modulator by using periodically domain-inverted structure in a long wavelength operation," *OFC 2003*, MF53, 2003.
- [5] H. Murata, K. Kaneda, Y. Okamura, "38GHz optical single-sideband modulation by using guided-wave electrooptic modulator with periodic

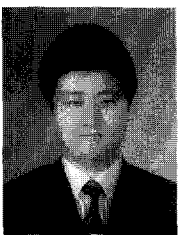
polarization reversal," Proceedings of the conference on Lasers and Electro-Optics 2004, CThT10, pp. 293-295, May 2004.

[6] G. D. Miller, Ph.D. dissertation, Stanford University, 1998.

[7] V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. G. Batchko, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Recent Achievements in Domain Engineering in Lithium Niobate and Lithium Tantalate," Ferroelectrics, vol. 257, pp. 191-202, 2001.

[8] W. K. Burns, W. McElhanon and L. Goldberg, "Second Harmonic Generation in Field Poled, Quasi-Phase-Matched, Bulk LiNbO₃," IEEE Photonics Tech. Lett. Vol. 6, No. 2, pp. 252-254 February 1994.

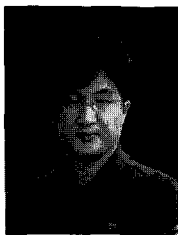
저 자 소 개



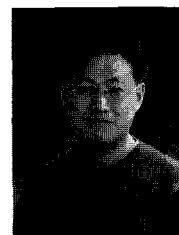
정 우 진(정회원)
 2005년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 학사 졸업.
 2007년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 석사 졸업.
 <주관심분야 : 광 소자 설계, 비선형 광 소자>



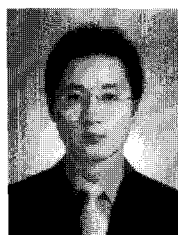
김 우 경(정회원)
 2001년 서울시립대학교 전자전기 공학부 학사 졸업.
 2003년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 석사 졸업.
 <주관심분야 : 집적 광소자, 비선형 광 소자>



양 우 석(정회원)
 1997년 건국대학교 물리학과 학사 졸업.
 2000년 성균관대학교 신소재공학과 석사 졸업.
 2004년 성균관대학교 신소재공학과 박사 졸업.
 <주관심분야 : PPLN, 비선형 집적 기술, 근/중적외 레이저 발생 집적화 기술, 광바이오 센서 등>



이 형 만(정회원)
 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사 졸업.
 2000년~현재 전자부품연구원 나노바이오센터 선임연구원
 <주관심분야 : 근/중적외 레이저 발생 집적화 기술, 광바이오 센서, 비선형 집적 기술 등>



권 순 우(정회원)
 2005년 한국항공대학교 항공재료 공학과 학사 졸업.
 2007년 한국항공대학교 항공재료 공학과 석사 졸업.
 <주관심분야 : PPLN, 광바이오 센서>



송 명 근(정회원)
 2006년 한국항공대학교 항공재료 공학과 학사 졸업.
 2006년 한국항공대학교 항공재료 공학과 석사 입학.
 <주관심분야 : PPLN >



이 한 영(정회원)
 1989년 서강대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1991년 서강대학교 전자공학과 석사 졸업.
 1993년 University of Manchester 전자재료 석사 졸업.
 전자공학과 석사 졸업.

1996년 UMIST 전자재료 박사 졸업.
 <주관심분야 : 전기광학 소자, 초고주파 광학 소자, 비선형 집적 기술, 근/중적외 레이저 발생 집적화 기술, 광바이오 센서 등>