

Periodically domain inversion and optical properties of low-loss Ti : LiNbO₃ waveguides

W.-S. Yang^{†,****}, S.W. Kwon^{**}, H.M. Lee^{*}, W.K. Kim^{*}, D.H. Yoon^{***} and H.-Y. Lee^{*}

^{*}Nano Bio-photonics Team, Korea Electronics Technology Institute, Bundang 463-816, Korea

^{**}Department of Materials Engineering, Hankuk Aviation University, Goyang 412-791, Korea

^{***}Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received November 4, 2005)

(Accepted January 25, 2006)

Abstract Periodic electric field assisted poling low loss (~0.1 dB/cm) single-mode Ti-diffused waveguides in LiNbO₃ has been achieved using a periodically patterned electrode on the +Z surface of Ti : LiNbO₃ crystal and homogeneous LiCl solution. Using selective chemical etching, we confirmed the periodic (~16 μm) domain inverted structure and measured SH (second harmonic) properties of fabricated periodically poled Ti : LiNbO₃ waveguides.

Key words Ti : LiNbO₃, Waveguide, Periodic poling, Domain, Propagation loss

저손실 Ti : LiNbO₃ 광도파로의 주기적 분극 반전과 광학특성

양우석^{†,****}, 권순우^{**}, 이형만^{*}, 김우경^{*}, 윤대호^{***}, 이한영^{*}

^{*}전자부품연구원 나노바이오포토닉스팀, 분당, 463-816

^{**}항공대학교 항공재료학과, 고양, 412-791

^{***}성균관대학교 신소재공학과, 수원, 440-746

(2005년 11월 4일 접수)

(2006년 1월 25일 심사완료)

초 록 저손실 Ti : LiNbO₃ 광도파로 기판에 외부전계 인가법을 사용하여 주기적으로 도메인을 반전시켰다. LiNbO₃의 -Z 면에 Ti 패턴 형성 후 약 1060°C에서 열처리 과정을 통해 광도파로를 형성하였으며, 제작된 광도파로의 광전송 손실은 ~0.1 dB/cm였다. 도메인 반전을 위해 +Z면에 주기적인 전극 패턴을 형성하였으며, 외부전계의 균일한 인가를 위해 LiCl 전해 용액을 사용하여 도메인을 반전 시켰다. 선택적 화학식각을 통해, 약 16 μm의 도메인 반전 주기를 확인 할수 있었으며, 주기적 도메인 반전구조를 갖는 Ti : LiNbO₃ 도파로의 비선형 특성을 측정하였다.

1. 서 론

대기에는 HF, H₂CO, CH₄, NO, SO₂ 및 CO 등과 같은 많은 가스들이 포함되어있으며, 이러한 가스들의 기본 흡수 밴드는 근적외선 영역에 분포하고 있다. 따라서, 대기에 포함되어 있는 소량의 환경가스들은 근적외선 영역에서의 복사스펙트럼 측정을 통해 검출이 가능하다. 그러나, 현재 사용되고 있는 레이저 소스들은 낮은 분광 분해능, 높은 파워손실, 큰 사이즈를 가지며, 파장변환이 자유롭지 못하고 냉각 시스템을 필요로 하는 제약을 가

지고 있다. 따라서, 효과적인 대기환경가스 측정 시스템은 상온에서 동작이 가능하며, 안정된 출력의 소형 근적외선 레이저 소스를 필요로 한다[1-3].

비선형 특성을 갖는 광결정 또는 광도파로를 이용할 경우 difference-frequency generation(DFG)을 통한 근적외선 가간섭성 발진이 가능하다. 특히, 주기적 도메인 반전 구조를 갖는 광도파로의 위사유사정합을 이용할 경우 광결정의 복굴절 유사정합을 이용하는 것 보다 소형의 유동성 있는 고효율 근적외선 영역의 파장변환이 가능하다[4-7].

본 연구에서는 고효율의 근적외선 파장변환소자 구현을 위해 조화용융조성의 LiNbO₃ 결정기판에 Ti 확산을 통한 저손실 광도파로를 제작하였으며, 광도파로에 주기적 도메인 반전 구조를 형성시켰다. 선택적 화학 식각을 통

[†]Corresponding author
Tel: +82-31-789-7395
Fax: +82-31-789-7399
E-mail: wsyang@keti.re.kr

해 광도파로의 도메인 구조를 관찰 하였으며, 주기적 도메인 반전된 Ti 확산 LiNbO₃ 광도파로의 제 2차 조화파 (second harmonic generation) 특성을 측정하였다.

2. 실험 방법

Ti : LiNbO₃ 광도파로는 0.5 mm 두께의 LiNbO₃ 기판의 -Z 면 위에 두께 990 nm의 티타늄을 증착하였으며, 폭 7 μm의 채널 형태로 x-축에 평행하게 패터닝하였다. LiNbO₃ 기판위에 형성된 Ti 패턴은 아르곤 분위기에서 8시간 동안 1060°C에서 열처리 하였으며, 1시간 동안 산소분위기에서 산화시켜 완성하였다. 이렇게 형성된 광도파로는 1.5 μm 영역에서 단일모드를 갖는다.

LiNbO₃ 기판은 광도파로 제작을 위한 열처리 과정동안 강유전 결정의 초전현상과 표면에서의 Li₂O 외부확산으로 인해 약 3 μm 깊이를 갖는 균일한 도메인 반전 층을 +Z면에 형성시킨다. 이러한 도메인 반전 층의 형성은 한 기판 내에 두개의 상반된 도메인 층을 가짐으로써 외부전계 인가를 통한 주기적 도메인 반전을 위해 저해요소로 작용한다. 따라서, +Z면에 형성된 도메인 반전 층을 기계적 연마과정을 통하여 제거해 주었다.

LiNbO₃ 결정은 ~21 kV/mm 이상의 전압을 가해주었을 때 항상 +Z 면에서 도메인 반전이 시작된다. 따라서, -Z 면에 형성된 도파로 기판의 양쪽면에 전극형성 및 기판 전체 영역에 약 10.5 kV 전압을 인가하여 기판의 도메인 방향을 반전시켜 도파로 형성 면이 +Z이 되도록 하였다. 도파로가 형성된 LiNbO₃ 결정 면 위에 감광제 도포 및 포토리소그라피 공정을 통하여 분극반전을 위한 패턴을 형성하였다. 패턴의 오픈영역의 폭은 3.3~5.8 μm이며, duty cycle은 19.8~34.9%이다. +Z면 위에 형성된 패턴의 오픈 영역은 LiCl 용액으로 채워졌으며, -Z면 전체에도 균일한 전극형성을 위해 LiCl 용액으로 채워졌다. 전류와 전하의 제어 하에서 ~10 kV 전압을 인가하여 주기적 반전구조를 갖는 도메인 패턴을 제작하였다.

주기적 도메인 구조를 갖는 Ti : LiNbO₃ 도파로 기판은 10×50 mm²의 크기로 가공한 후 도파로 전성손실 및 비선형 특성을 측정하였다. 또한, 도메인 구조 확인을 위해 HF : HNO₃ 용액을 이용하여 약 15분 동안 선택적 화학 식각을 수행한 후 광학 현미경을 이용하여 도파로에 제작된 도메인의 균일성 및 duty cycle을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에 1550 nm 입사파장에 대한 Ti : LiNbO₃ 광도파로의 모드 사이즈와 광전송 손실 결과를 나타내었다.

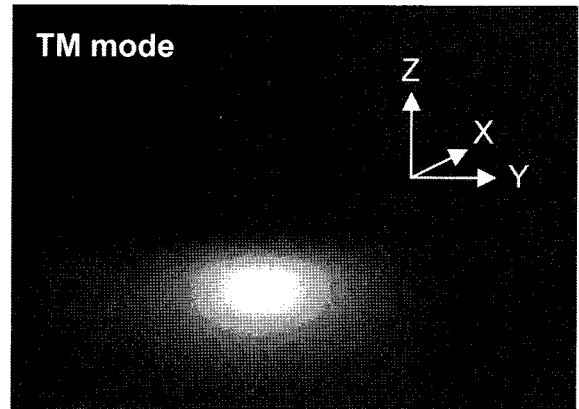


Fig. 1. Mode intensity distribution of Ti-diffused waveguide at 1550 nm wavelength.

TM 모드에 대한 FWHM(full width half maximum)은 Y 및 Z방향에 따라 각각 5.6과 3.3 μm로 측정되었다. TM 모드에 대한 Ti : LiNbO₃ 도파로 손실은 Fabry-Perot 방법으로 측정되었으며, 약 0.1 dB/cm의 낮은 광전송 손실을 나타내었다.

주기적 분극을 위한 전하량은 자발분극(spontaneous polarization)과 반전 영역과 관계되며, $Q = 2P_sA$ 로 표

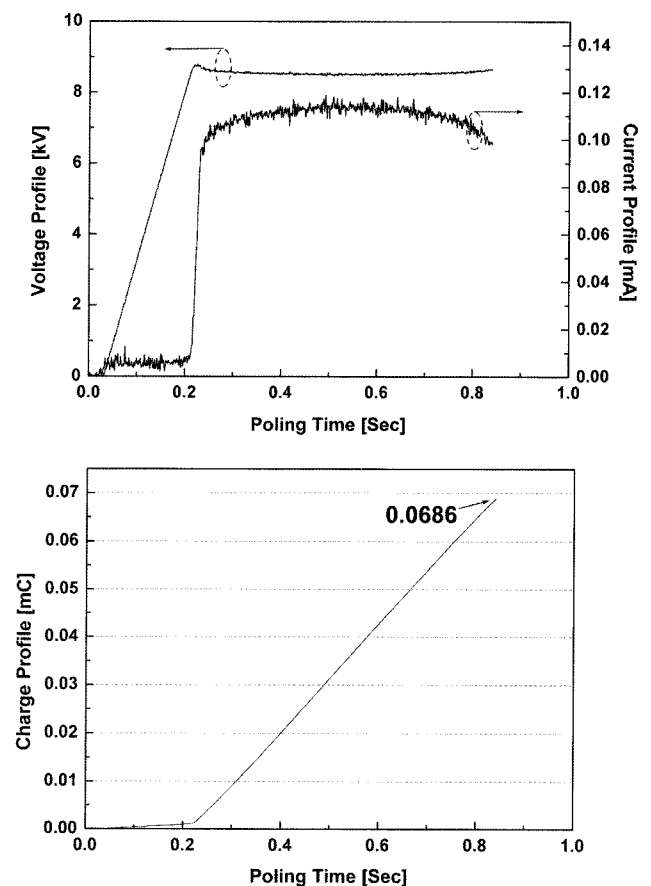


Fig. 2. Voltage, current and charge versus time during poling of a 0.4 mm thick sample of z-cut waveguide LiNbO₃.

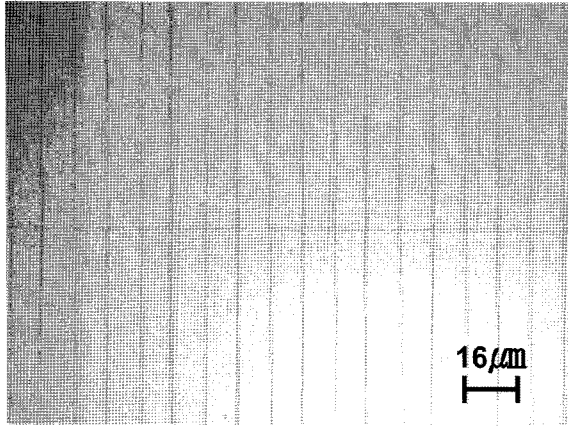


Fig. 3. Periodically domain structure in waveguide-type congruent LiNbO₃ after selective chemical etching on the +z surface.

현되어질 수 있다. 이때, Q 는 전하량, P_s 는 자발분극, A 는 분극반전 영역이다. 조화용융 조성 LiNbO₃ 결정의 자발분극 및 강제전압(coercive field) 값은 약 $\sim 81 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 과 $\sim 21 \text{ kV}/\text{min}$ 값을 갖는다. 따라서, 분극반전을 위한 강제전압 하에서 전하량을 제어함으로써 분극 반전 영역의 비율 제어가 가능하다.

Fig. 2에 주기적 분극반전 동안 시간에 따른 전류, 전압 및 전하량을 나타내었다. 0.4 mm 두께의 Ti : LiNbO₃ 도파로 기판의 주기적 분극반전을 위해 강제 전압 8.4 kV 하에서 0.0686 mC의 전하량 제어로 분극 반전시켰다. 인가 전압에 대한 전류는 약 0.11 mA에서 유지되며 0.8 sec 이후 0.0686 mC 전하량을 충족하여 분극반전이 멈추어지게 된다. 0.8초 근방에서 전류의 곡선이 약간 낮아지는 것은 오픈 영역의 분극이 반전 된 후 절연 패턴 쪽으로 분극벽이 진행되어지고 있었음을 알 수 있다.

Fig. 3에 주기적으로 분극 반전된 Ti : LiNbO₃ 도파로의 +Z면을 나타내었다. 주기적 분극 반전된 구조를 관찰하기 위해 기판을 HF와 HNO₃ 용액을 1 : 2의 비율로 혼합하여 상온에서 15분 동안 식각하였다. 도파로가 형성되지 않은 영역의 분극은 균일한 반전영역 비율을 보였으며, 평균 duty cycle은 49.9% 였다. 이에 반해, 도파로 영역의 분극반전은 균일성이 떨어졌으며, 45~55% duty cycle 분포를 가졌다. 또한, 분극반전된 도파로 영역은 X 방향에 따라 반전되지 않은 영역에 비해 폭이 좁았다. 이는 도파로를 포함하는 오픈 영역에 전계가 가해졌을 경우 Ti 확산 LiNbO₃ 도파로 영역은 순수 LiNbO₃와 다른 도메인 성장 양상을 가지고 있음을 나타낸다. 이러한 원인으로는 전압이 가해졌을 때 기판 표면의 전극패턴 벽에서의 초기 핵생성, 분극 벽의 형성 및 진행 과정에서 LiNbO₃ 내에 혼입된 Ti⁴⁺ 이온에 의해 분극 벽 진행 속도의 차이를 유발시킨 결과라 생각 되어진다. 또한, LiNbO₃ 결정내 Ti⁴⁺ 이온들의 균일성 분포의 차이가 Ti : LiNbO₃ 도파로의 분극반전 균일성에 영향을 미

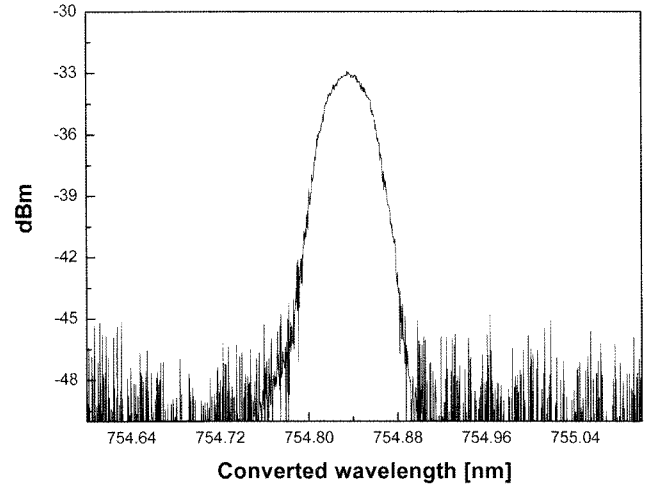


Fig. 4. Converted wavelength of waveguide-type periodically poled LiNbO₃ at 1510 nm wavelength.

치고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4에 주기적 분극 반전된 Ti : LiNbO₃ 도파로에 대한 2차 조화파(second harmonic generation) 특성을 나타내었다. 파장변환 측정을 위하여 7 mW, 1510 nm 입사 파장을 사용하였으며, 변환과정은 광스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)로 측정하였다. 측정을 위해 25 mm 길이의 주기적 분극반전 Ti : LiNbO₃ 도파로 기판의 양쪽면을 광학연마 하였으며, 광학코팅을 하지는 않았다. 소자의 입력 및 출력 단은 광화이버로 커플링시켰다. 측정된 변환 파장 스펙트럼의 중심파장은 754.8 nm 였다. 따라서, 도파로에 진행되는 광파의 에너지는 주기적 분극에 의해 보존되고 있으며, 유사위상정합을 통해 제 2차 조화파(SHG)가 발생함을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 변환 파장의 광파워는 $P_{\text{out}} \approx 1/4 \mu^2 L^4 P_p^2 P_s$ 로 표현되며, L 은 도파로의 길이, P_p 와 P_s 는 입력 및 신호 광파워를 나타낸다. 변환 파장의 출력은 주기적 분극 반전 도파로의 길이와 입력광의 파워에 비례하며, 입력 광파워의 증가 또는 도파로의 길이가 길수록 변환효율이 극대화 됨을 나타내어지고 있다. 따라서, 측정된 754.8 nm 변환 파장은 입력 광파워의 증가를 통해 더 높은 광출력을 얻을 수 있을 것으로 생각 되어진다.

4. 결 론

광 전송 손실 0.1 dB/cm을 갖는 Ti : LiNbO₃ 도파로 기판을 이용하여 외부전계 인가 방법을 이용하여 주기적 분극 반전시켰다. 분극 반전된 도파로 영역은 도파로가 형성되지 않은 영역에 비해 주기적 분극 반전 균일성이 떨어졌으며, 45~55% duty cycle 분포를 가졌다. 도파로가 형성되지 않은 영역의 평균 duty cycle은 49.9% 였으

며, 균일한 분극반전 모습을 나타내었다. 또한, 입력광 7 mW, 1510 nm 파장에 대해 754.8 nm의 중심파장을 갖는 제 2차 조화파(second harmonic generation)를 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] K.W. Chang, A.C. Chiang, T.C. Lin, B.C. Wong, Y.H. Chen and Y.C. Huang, "Simultaneous wavelength conversion and amplitude modulation in a monolithic periodically-poled lithium niobate", *Opt. Commun.* 203 (2002) 163.
- [2] L. Goldberg, J. Koplow, D.G. Lancaster, R.F. Curl and F.K. Tittel, "Mid-infrared difference-frequency generation source pumped by a 1.1~1.5- μ m dual-wavelength fiber amplifier for trace-gas detection", *Opt. Lett.* 23 (1998) 1517.
- [3] D.J.L. Birkin,^a E.U. Rafailov, G.S. Sokolovskii, W. Sibbett, G.W. Ross, P.G.R. Smith and D.C. Hanna, "3.6 mW blue light by direct frequency doubling of a diode laser using an aperiodically poled lithium niobate crystal", *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 3172.
- [4] M. Sato, P.G.R. Smith and D.C. Hanna, "Contact electrode method for fabricating bulk periodically poled LiNbO₃", *Electronics Letters* 34 (1998) 660.
- [5] L.E. Myers, R.C. Eckardt, M.M. Fejer, R.L. Byer, W.R. Bosenberg and J.W. Pierce, "Quasi phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃", *J. Opt. Soc. Amer. B* 12 (1995) 2102.
- [6] N. Saito, S. Wada, H. Taniguchi, M. Nakamura, Y. Urata and H. Tashiro, "Difference-frequency generation in MgO-doped periodically poled LiNbO₃ using an electronically tuned Ti:sapphire laser in dual-wavelength operation", *Jpn. J. Appl. Phys.* 39 (2000) 1767.
- [7] K. Nakamura, J. Kurz, K. Parameswaran and M.M. Fejer, "Periodic poling of magnesium-oxide-doped lithium niobate", *J. Appl. Phys.* 91 (2002) 4528.