

Ti:PPLN 광도파로를 이용한 비선형광학 기반의 의사 위상정합 2차 조화파 발생

정흥식[†]

홍익대학교 과학기술대학 전자전기공학과
☎ 339-701 충청남도 조치원읍 신안동 300

정영식

인천대학교 공과대학 전기공학과
☎ 402-749 인천시 남구 인천대길 319

(2008년 11월 18일 받음, 2008년 12월 18일 수정본 받음, 2008년 12월 19일 게재 확정)

고전압 펄스를 인가시켜서 주기적으로 도메인을 반전시키는 공정을 검토하였으며, 이를 적용해서 제작된 Ti 확산 리튬나오베이트 채널광도파로(Ti:PPLN) 기반의 의사 위상정합 2차 조화파 발생을 체계적으로 측정하였다. 2차 조화파 발생을 위해서 16.6 μm 분극 주기와 49 mm 길이의 Ti:PPLN 채널광도파로를 제작하였으며, 473(%/W) 변환효율이 측정되었다.

주제어: 광도파로 집적소자, 비선형광학효과, 도메인반전, 주기분극 리튬나오베이트, Ti:PPLN 채널 광도파로, 의사위상정합, 제 2 조화파 발생

I 서 론

오늘날 인터넷 사용량의 폭발적인 증가로 인해서 데이터 트래픽은 매우 빠른 속도로 증가되고 있으며, 이러한 경향은 더욱 가속화되고 있다. 따라서 최근 이러한 통신망의 환경 변화에 대응하기 위하여 초고속 대용량 광 네트워크 기술을 효율적으로 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 광 네트워크의 초고속화를 위해서는 전광(all-optical) 기능을 보유하고 있는 관련 광 부품들의 초고속 특성이 요구되는 추세에 있으며, 다양한 전광 부품들 중에서 비선형 전광 광 집적소자들이 그러한 시스템 구성에 있어서 매우 중요한 역할들을 담당할 수 있는 것으로 평가되어지고 있다.^[1]

리튬나오베이트(LiNbO₃)는 높은 비선형(nonlinear) 광학계수($d = 17 \text{ pm/V}$)를 보유하고 있으며, 결정의 길이가 90 mm 까지 활용할 수 있도록 대형 단결정 성장이 가능하고 그리고 화학적으로 안정하기 때문에 주기적으로 도메인이 반전된 리튬나오베이트(PPLN: periodically poled LiNbO₃)를 활용하는 비선형 전광 광집적소자들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2차 조화파 발생기(SHG: second harmonic generator),^[2] 광 매개변수 발진기(OPO: optical parametric oscillator),^[3] 광 매개 변수 증폭기(OPA: optical parametric amplifier),^[4] 광 시분할 다중화기(OTDM: optical time-division multiplexer),^[5] 파장 변환기(wavelength converter)^[6] 등과 같이 비선형광학 광도파로 소자들을 기반으로 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 한편 리튬나오베이트와 같은 비선형광학 결정의 굴절률은 일반적으로 파장 분산 특성이 있기 때문에 기본파와 조화파의 유효굴절률이 같지 않아서 그들 간에 위상속도

차가 발생되며, 비선형 광학효과를 효과적으로 활용하기 위해서는 그와 같은 위상속도 분산(dispersion)을 보상해주는 것이 반드시 필요하다.^[7]

비선형광학 결정에서 분극(polarization)의 방향을 주기적으로 180° 반전시키는 의사위상정합(QPM: quasi phase matching)은 분극반전 주기로 동작파장 영역을 설정할 수 있기 때문에 비선형광학 기반의 집적광학소자 분야에서 중요한 연구 주제로 다루어져 왔다. 특히 리튬나오베이트를 주기적으로 분극을 반전시킬 수 있는 다양한 방법들이 시도되었다. 그러한 방법들 중에는 리튬나오베이트 결정을 성장시키는 동안 분극 방향을 교번으로 바꾸는 방법,^[8] 표면에 불순물을 확산시켜서 분극을 반전시키는 방법,^[9] 전자빔을 이용한 방법,^[10] 그리고 리튬나오베이트 z축면에 사진식각(photolithography) 공정을 이용하여 전극을 형성하고 고전압 펄스를 인가하는 방법들이 시도되었으며, 후자와 같이 고전압 전계에 의한 분극반전을 기반으로 한 Ti:PPLN의 제작 및 응용에 대해서 많은 연구가 진행되었다. 이 원리는 1962년에 암스트롱에 의해 제안된 것이지만,^[11] 결정 내에 수 μm 정도 크기의 분극반전 주기를 형성할 수 있는 적절한 공정 기술이 없었기 때문에 90년대 후반까지 활용되지 못하고 있었다.

Ti 확산으로 형성된 채널 광도파로에 고전압 펄스에 의한 분극반전 공정에서 사진식각 패턴과 열처리 과정, 분극 지그(zig)의 구조 그리고 고 전압 펄스의 duty-cycle 등을 포함해서 다양한 공정 파라미터들이 분극반전 도메인에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 독일 패더본(Paderborn) 대학의 Sholer 교수 그룹에서 제안된 분극반전 공정을 기반으로 분극반전 공정을 체계적으로 검토, 적용하여 Ti:PPLN을 제작하였으며, 제 2차 조화파 발생을 통해서 분극반전을 포함해서 Ti:PPLN 소자의 성능을 검토하였다.^[12]

[†]E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

II. 분극반전 공정

본 연구에서는 고전압 분극반전 공정을 이용하여 상온에서 Ti:PPLN 채널 광도파로를 제작하였다. PPLN 제작공정에 관한 주요 연구들은 국외 우수 연구 기관들에 의해서 많은 연구가 진행되어져 왔으며, 이와 관련된 국내의 체계적인 연구는 매우 부족한 상태이다.

Ti:PPLN 제작공정은 채널 광도파로 형성, 감광액을 이용한 전해액 전극의 패턴 형성, 그리고 고 전압을 통한 분극반전 등 그림 1과 같이 여러 단계들로 이루어지고 있다. 두께 0.5 mm의 z-cut LiNbO₃ 시편을 12 mm × 50~60 mm(폭×길이) 크기로 준비하였다. 이때 스프인코팅 시 균일한 감광액 두께를 얻기 위해 시편의 가장자리 부분을 연마하였다. 광도파로는 리튬나오베이트 시편 표면 아래에 제작되기 때문에 표면 상태를 청결하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 화학약품에 의한 표면 오염 또는 손상은 PPLN 채널광도파로의 전파 손실(propagation loss)을 증가시키거나 원치 않는 위상부정합의 요소로 작용할 수 있다.

-z 축 LiNbO₃ 표면에 e-beam 증착기를 이용하여 증착된 ~1000 Å 두께의 Ti를 사진식각 공정과 습식 식각 공정으로 ~7 μm 폭의 Ti 채널 패턴을 형성한 다음, 1060°C 온도에서 8 시간 동안 확산하여 1.55 μm 파장 대역에서 동작하는 단일모드 채널 광도파로를 제작하였으며, 그림 1의 첫 번째, 두 번째 단계에 해당된다. 고온의 확산 과정에서 Li⁺ 원소의 외부확산(out-diffusion) 현상 때문에 나타나는 평면형 기생(parasite) 광도파로를 억제하기 위해서 리튬나오베이트 샘플들을 플라티늄(platinum) 박스에 넣어, 습식산소(wet-O₂) 분위기에서 확산을 수행하였다.

1000°C 이상의 고온에서 열처리를 할 경우 LiNbO₃의 +z

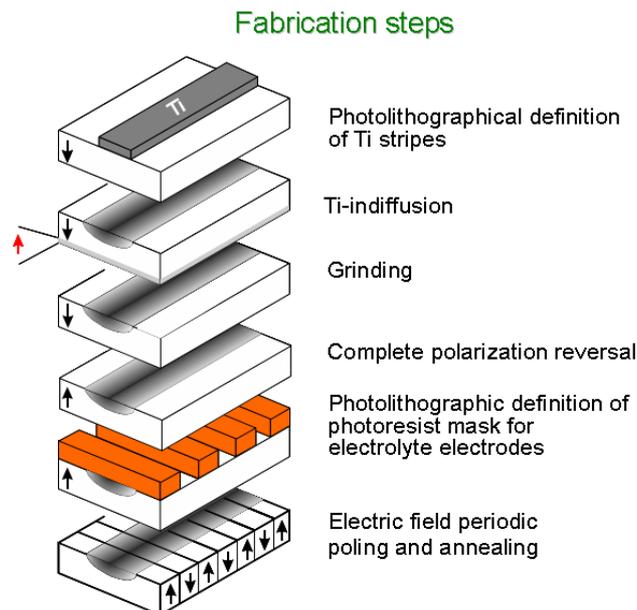


그림 1. Ti:PPLN의 단계적인 공정 절차.

축 표면이 -z 축으로 도메인 반전이 일어나는 것으로 알려져 있기 때문에 분극 반전된 표면을 40~50 μm 정도로 연마하여 -z 축 표면을 제거시키는 과정이 필요하며, 그림 1의 세 번째 단계에 해당된다.^[7] 따라서 광도파로를 +z 축 표면 위에 만들지 않은 이유가 여기에 있으며, 연마 후 샘플들의 두께는 ~450 μm로 측정되었다.

주기 분극반전 공정을 시행하기 전에 -z 축 표면을 +z 축으로 반전시키기 위해서 그림 2, 3과 같이 분극 지그와 분극반전 시스템을 이용하여 -z 축 표면 전체를 반전시키는 공정이 필요하며, 그림 1의 네 번째에 해당된다. 그림 2는 분극반전을 위해 고안된 지그에 LiNbO₃ 시편이 직접 장착되어있는 형태를 보여주고 있다. 감광액으로 주기 격자가 형성된 LiNbO₃ 시편을 경계로 양쪽으로 전해용액을 가두고, 시편과의 접촉이 균일하게 될 수 있도록 실리콘 오링을 사용하여 전도성 LiCl(lithium chloride) 전해질 용액을 오링 안에 채웠다. 그리고 고전압이 인가되었을 때 스파크가 생기는 것을 방지하기 위해 오링 바깥쪽으로 확산펌프 오일을 채웠다.

분극용 지그와 더불어 그림 3과 같은 분극반전 장치를 구성하였다. ~0.5 mm 두께의 시편에 분극반전에 필요한 임계전압 이상의 10.5~11.5 kV 고전압을 인가하였으며, 고전압 인가 직후 수 mA의 전류가 2~3초 흐르다가 분극반전이 완료되면 갑자기 전류가 매우 작아지는 현상이 관찰되었다. 자

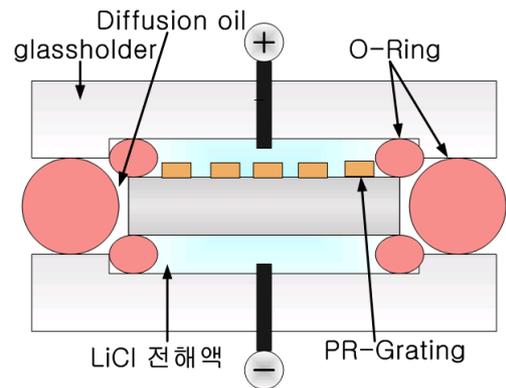


그림 2. 도메인 반전용 분극 지그의 개략도.

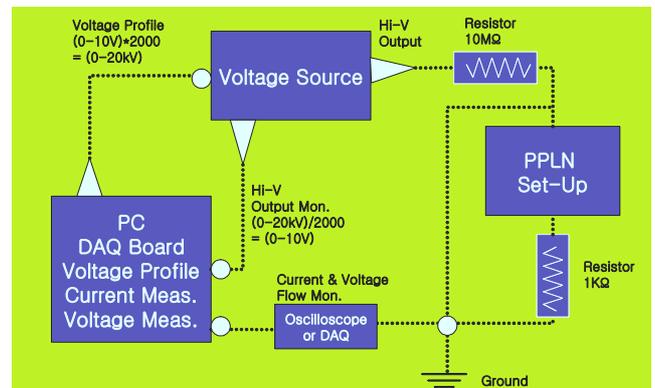


그림 3. 주기 도메인반전 장치 시스템 구성도.

발분극의 방향을 바꿔주기 위한 최소의 외부전압을 분극반전 임계 전압이라 한다.

주기적인 분극반전을 수행하기 위해서 감광액 AZ4533과 사진식각 공정을 통해서 주기적인 형태로 감광액 패턴을 +z 축면에 형성하였으며, 그림 1의 다섯 번째 단계에 해당된다. 감광액 AZ4533은 높은 절연성을 가지고 있기 때문에 140°C 이상의 온도에서 hard-baking 되었을 때 절연체로서 좋은 특성을 보이고 있다. 감광액 주기 패턴의 선폴은 이론적으로 필요로 하는 선폴보다 약 0.75 μm 정도 더 넓게 제작하였다. 높은 온도의 hard-baking 과정에서 감광액은 수축되며, 이러한 작용으로 이론적인 패턴 폭과 실제 공정 후 감광액 패턴 폭간에 오차가 발생되기 때문이다. 그리고 분극반전을 수행하기 전에 원하지 않는 초전효과(pyro-electric effect)를 피하기 위해서 감광액의 열처리 온도상승을 약 20~30°C/h 정도로 하였다.^[13] 본 연구에서는 100, 120, 140°C 온도에서 1시간씩 단계적으로 hard-baking을 수행하였다. 그림 1의 네 번째 단계와 같은 방법으로 분극용 지그(그림 2)와 고전압 인가 시스템(그림 3)을 이용해서 주기 분극반전 공정을 수행하였으며, 그림 1의 마지막 단계에 해당된다.

III. 분극반전 실험결과

3.1 분극반전

그림 4와 5는 그림 1의 4, 6 단계 분극공정 시 측정된 전류 및 전하량

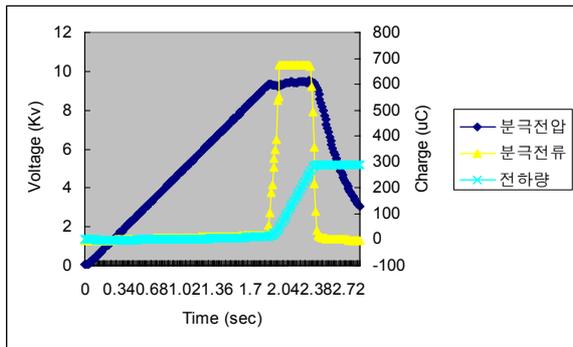


그림 4. 표면 전체에 대한 분극반전 공정에서 측정된 전류 및 전하량(그림 1의 네 번째 단계).

및 전하량들을 보여주고 있다. 이 경우에 있어서 분극 반전이 일어나는 면적을 계산해서 표 1에 요약된 값들로 그림 3의 분극반전 시스템에 적합한 파라미터들을 설정한 후 분극 공정을 수행하였다. 고전압 펄스가 공급되는 동안 예상되는 전류 및 전하량에 도달하게 되면 분극반전에 도달된 것으로 간주하여 자동적으로 고전압 인가가 중단되도록 하였다. 그림 4의 분극반전은 9.4 kV에서 일어났으며, 이때 공급된 전하량은 290 μC으로 측정되었다. 한편 그림 5의 주기 분극반전에는 9.19 kV에서 일어났으며, 394 μC의 전하량이 측정되었다.

그림 6은 분극반전 후 관찰된 시편의 표면 사진이다. 그림 6(a)는 분극반전 직후 표면 사진이며 주기적인 분극패턴이 뚜렷하지 않았으나, 120°C 온도에서 2시간 동안 열처리를 수행 할 경우 분극패턴을 그림 6(b)와 같이 좀 더 잘 관찰할 수 있었다. 그림 6(c)는 샘플들을 HF 용액에서 2분 동안 식각시킨 후 +z 면에서 관찰된 표면으로 매우 뚜렷하게 주기 패턴을 보여주고 있다.

채널 광도파로가 형성된 리튬나오베이트의 표면손상이나 오염은 전극 패턴을 준비하는 과정이나 분극반전 과정 동안에 주로 발생된다. 감광액 박막은 분극반전 과정에서 높은 전압이 인가되었을 때 예상하지 못한 “spark”와 반응하여 웨이퍼 표면에 손상을 줄 수 있다. Ti:PPLN 성능에 영향을 미치는 또 다른 요소는 소자의 전 길이에 걸쳐서 위상정합이 유지되어야 하기 때문에 채널 광도파로의 전파 특성을 균일

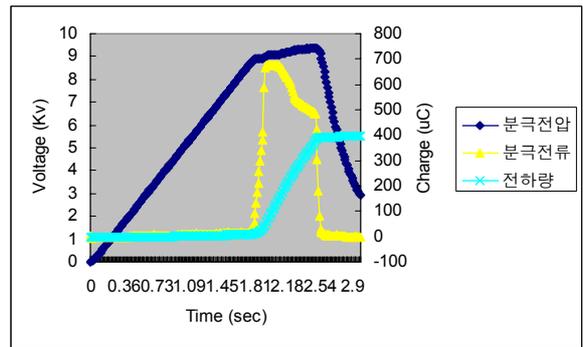


그림 5. 주기 분극반전 공정에서 측정된 전류 및 전하량(그림 1의 여섯 번째 단계).

표 1. 그림 4, 5의 분극반전 시스템에 설정된 파라미터

파라미터	그림 4의 분극반전 공정	그림 5의 분극반전 공정
시편의 크기(mm × mm)	66×7	66×7
고전압 Rise Rate(kV/s)	5	5
고전압 Fall Rate(kV/s)	20	20
고전압 최대 인가 전압(kV)	10.5	10.0
예상되는 분극반전 전류(μA)	500	350
공급되는 전하량(mC)	1.0	0.375
Shunt Resistor(kΩ)	14.8	14.8
Series Resistor(MΩ)	1.28	1.28

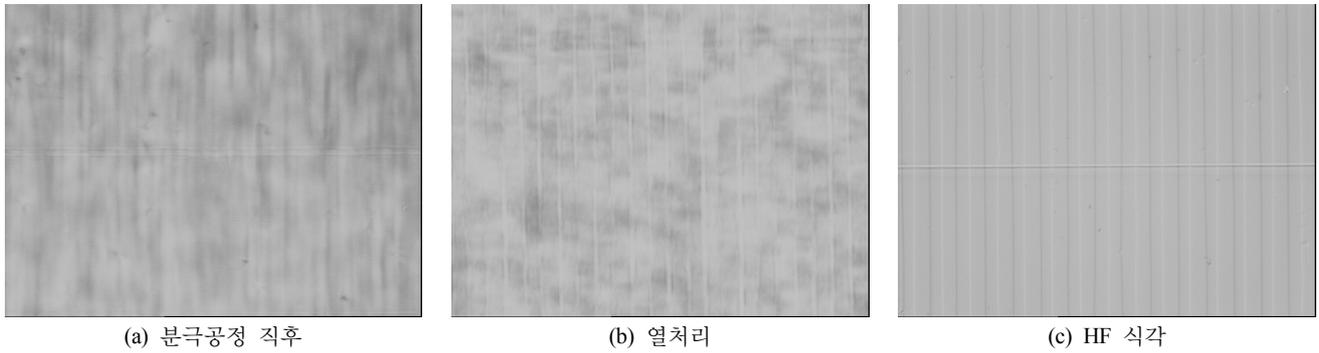


그림 6. 분극반전 공정 후 측정된 표면 사진.

하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 분극반전은 강유전체의 자발분극의 방향을 바꾸어 주는 것이기 때문에 고전압을 시편에 인가해야 된다. 높은 전압을 시편에 인가할수록 분극반전은 더욱 더 쉽게 일어나게 되지만 시편 자체가 고전압을 견디지 못하고 깨지는 현상, 즉 절연파괴(breakdown) 현상이 발생하기 쉽다. 이런 현상은 시편을 다루는 과정에서 생길지도 모르는 표면 손상, 세척 과정 중에서 화학약품으로 인한 표면 오염, 리튬나오베이트 조성비의 불균일 등에 의해 매우 민감하게 영향을 받는다. 또한 강유전체 고유의 성질인 초전현상으로 인해서 시편 내부의 전하분포가 틀러지게 되는데, 이러한 전하분포의 불균형은 고전압을 인가했을 때 절연파괴가 일어나는 주요인이 된다.

3.2 Ti:PPLN의 전파손실 및 도파모드

제작된 Ti:PPLN의 소자길이는 60 mm, 주기는 $\Lambda = 16.6 \mu\text{m}$ 로 분극반전이 수행되었으며, TE, TM 모드에 대해서 ~ 0.01 dB/cm 전파손실(propagation loss)이 측정되었다. 여기서 전파손실은 광도파로에 입사된 광파가 광도파로를 따라 진행하면서 겪는 손실로 삽입손실(insertion loss)에서 Fresnel 손실과 모드 부정합 손실을 제외한 손실로 정의된다. 그림 7은 end-fire 결합시스템을 이용하여 측정된 Ti:PPLN의 near-field 모드 패턴들이며, TE, TM 모드 각각에 대해서 FWHM 기준으로 측정된 모드크기(수평/수직, μm)는 6.83/4.69, 4.77/3.47로 측정되었다.

IV. Ti:PPLN 기반의 2차 조화파 발생

4.1 이론적 검토

2차 조화파 발생은 비선형 광학 현상 중 가장 기본적인 현상이며, 효율이 매우 높은 과정 중 하나이다. 강하게 입사되는 기본파의 주파수가 두 배가 되는 형태로 새롭게 형성되는 2차 조화파는 기본파에 대해서 에너지가 두 배만큼 큰 새로운 광자를 만드는 과정이다. 본 절에서는 2차 조화파와 관련된 이론적 배경을 관련 수식과 함께 검토하였으며, 제작된 Ti:PPLN을 이용해서 2차 조화파를 측정하여 결과들을 분석하였다.

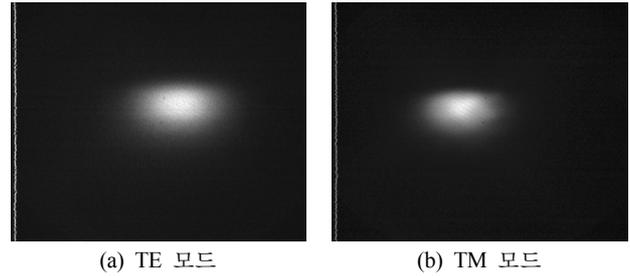


그림 7. 제작된 Ti:PPLN에서 측정된 near-field 모드 패턴.

Ti:PPLN 채널 광도파로에 ω 주파수를 갖는 펌프광파 E^ω 를 입사시킬 경우, 2차 조화파 발생과 밀접한 연관이 있는 리튬나오베이트의 2차 비선형 편파(polarization), $P^{2\omega}$ 는 다음과 같은 3×6 매트릭스 형태로 나타낼 수 있다.^[14]

$$\begin{bmatrix} P^{2\omega}_x \\ P^{2\omega}_y \\ P^{2\omega}_z \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{31} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (E^\omega_x)^2 \\ (E^\omega_y)^2 \\ (E^\omega_z)^2 \\ 2E^\omega_y E^\omega_z \\ 2E^\omega_z E^\omega_x \\ 2E^\omega_x E^\omega_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 매트릭스 $[d]$ 는 비선형광학 계수의 텐서이며,^[7] ϵ_0 는 자유공간에서 유전율이다. 텐서 중에서 d_{33} 계수가 LiNbO₃에서 가장 큰 값을 보유하고 있기 때문에 입사펌프 광으로는 E^ω_z TM-모드를 사용하는 것이 바람직하며, 이에 대응되는 2차 비선형 편파는 아래와 같게 된다.

$$P^{2\omega}_z = \epsilon_0 d_{33} E^\omega_x E^\omega_x \quad (2)$$

입사펌프 광이 Ti:PPLN 채널 광도파로를 따라 진행하면서 비선형광학효과에 의한 2차 조화파 발생은 아래와 같이 비선형 결합모드(coupled mode) 식에 의해서 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dz} A^w(z) = -j\kappa^* [A^\omega(z)]^* A^{2\omega}(z) \exp(-j2\Delta z) \quad (3-1)$$

$$\frac{d}{dz} A^{2\omega}(z) = -j\kappa [A^{\omega}(z)]^2 \exp(+j2\Delta z) \quad (3-2)$$

여기서 $A^{\omega}(z)$, $A^{2\omega}(z)$ 는 각각 입사펌프 광파 및 2차 조화파의 세기(amplitude)이며, 2Δ 와 κ 는 입사펌프 광파와 2차 조화파간의 위상 부정합(phase mismatch)과 결합계수(coupling coefficient)를 의미하며, 아래와 같이 정의된다.

$$\kappa = \frac{2\omega}{4} \epsilon_o \iint [E^{2\omega}(x,y)]^* d(x,y) [E^{\omega}(x,y)]^2 dx dy \quad (4)$$

$$2\Delta = \beta^{2\omega} - 2\beta^{\omega} = \frac{4\pi}{\lambda} (N^{2\omega} - N^{\omega}) = \frac{\pi}{L_c} \quad (5)$$

$\beta^{2\omega}$, β^{ω} 는 2차 조화파와 입사펌프 광파의 전파상수이며, $N^{2\omega}$ 와 N^{ω} 는 대응되는 각각 모드의 유효굴절률을 의미하며, L_c 는 코히어런트 길이(coherent length)로 아래와 같이 정의된다.

$$L_c = \frac{\lambda}{4(N^{2\omega} - N^{\omega})} \quad (6)$$

입사펌프 광파가 $z=0$ 에서 입사되어 $z=L$ 까지 진행되는 동안 $A^{\omega}(z) = A_0$ 입사펌프 파워가 균일하게 유지된다는 NPDA (no pump depletion approximation)로 가정하고, $A^{2\omega}(0) = 0$ 조건을 고려할 경우 2차 조화파는 다음과 같이 유도된다.

$$A^{2\omega}(z) = -j\kappa A_0^2 z \exp(j\Delta z) [\sin(\Delta z) / \Delta z] \quad (7)$$

여기서 $|A_0|^2$ 은 입사펌프 광 파워를 의미하며, $z=L$ 에서 변환효율(conversion efficiency)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{|A^{2\omega}(L)|^2}{|A_0|^2} = |\kappa|^2 P_o L^2 [\sin(\Delta L) / \Delta L]^2 \quad (8)$$

2차 조화파의 전파상수가 입사 펌프파워의 전파상수 두 배와 같을 경우 즉 $\beta^{2\omega} = 2\beta^{\omega}$ ($N^{2\omega} = N^{\omega}$) 조건하에서 $\Delta = 0$, $L_c \rightarrow \infty$ 즉 위상정합이 성립되어 2차 조화파는 동 위상(in-phase)으로 증폭된다. 즉 2차 조화파의 진폭은 진행방향에 따라 증가하여 2차 조화파 발생은 매우 효율적으로 일어나

게 된다. LiNbO₃는 굴절률 분산특성이 있기 때문에 위상정합을 하지 않을 경우 2차 조화파 발생의 효율은 매우 낮아지게 된다. 한편 Ti:PPLN 구조에서 도메인을 주기(= Λ)적으로 분극반전시 킬 경우 2차 비선형 계수는 다음과 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$d(x,y,z) = \sum_q d_q(x,y) \exp(-jqKz), \quad K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (9)$$

이에 대응해서 식 (5)의 위상부정합은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$2\Delta = \beta^{2\omega} - (2\beta^{\omega} + qK) \quad (10)$$

따라서 식 (10)에서 $\Delta = 0$ 가 될 경우, 2차 조화파의 전파위상이 비선형 편파들 중에서 하나와 정합되어 SHG 발생이 매우 효과적으로 일어나게 된다. 이러한 위상정합 방법을 의사(quasi) 위상정합 또는 격자(grating) 위상정합이라 일컫는다. 다른 관점에서 해석을 하면 비선형 편파와 2차 조화파간의 파동 벡터의 차를 격자 벡터 K 의 보상으로 위상정합을 이루는 것으로 해석될 수 있다.

4.2 2차 조화파 측정

그림 8과 같은 butt 결합 측정장치를 구성해서 제작된 Ti:PPLN의 2차 조화파를 측정하였다. 입사광원으로 ~1550 nm 파장대역의 2 mW ECL 파장가변 레이저, 입사광파와 2차 조화파의 세기 측정에는 각각 Ge, Si 광검파기를 사용하였으며, 트랜스컨덕턴스 전류 증폭기를 이용해서 2차 조화파의 낮은 광전류를 증폭해서 PC 모니터로 관찰할 수 있도록 하였다.

그림 9는 전장 49 mm, 분극반전 주기 $\Lambda = 16.6 \mu\text{m}$, 0.03dB/cm 전파손실을 나타내는 Ti:PPLN에 대해서 측정된 2차 조화파 분포 특성이며, 입사광파의 1529.80 nm 파장에서 위상정합이 일어나서 2차 조화파가 최대 측정 되었으며, 식 (8)의 이론적인 sinc 함수와 매우 유사한 분포 형태를 나타내는 것으로 관찰되었다. Ti:PPLN의 입사단면에서 나타나는 Fresnel 손실, 광섬유와 광도파로간의 모드 불일치(mode-mismatch) 그리고 전파손실 등을 고려하여 변환효율은 473(%/W)로 계산되었다. 이러한 변환효율은 기존 발표된 수치보다 훨씬 높

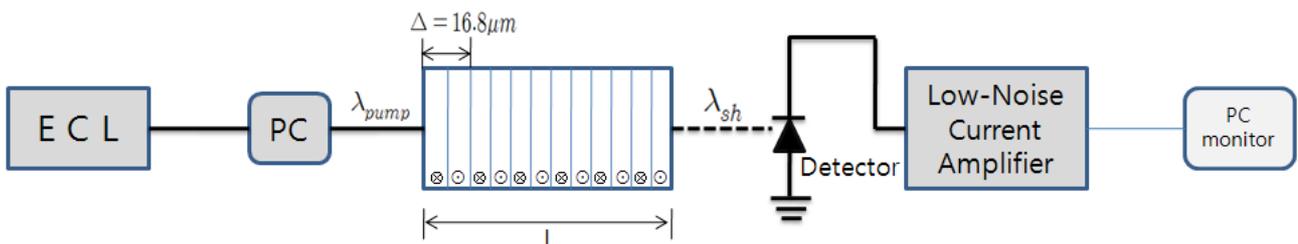


그림 8. 2차 조화파 측정에 사용된 butt 결합 장치 구성도.

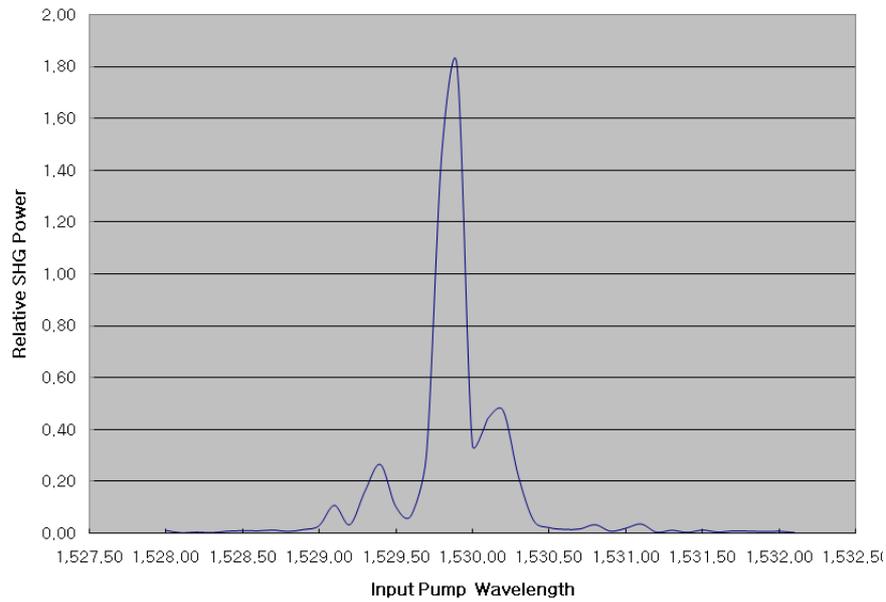


그림 9. 측정된 Ti:PPLN의 2차 조화파 세기 분포.

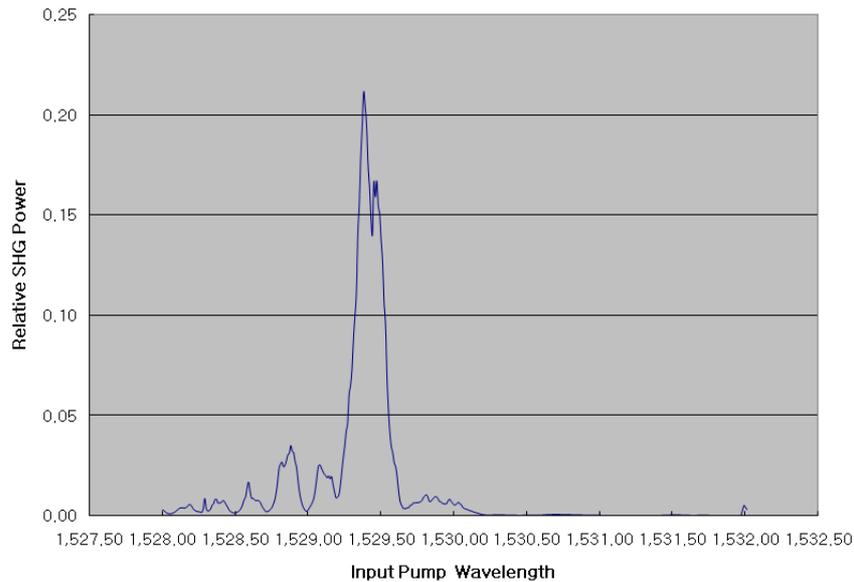


그림 10. 측정된 Ti:PPLN의 2차 조화파 세기 분포.

으며, 이러한 배경에는 분극 반전된 저 손실 광도파로에 기인되는 것으로 사료된다. 그림 10은 전장 49 mm, 분극반전 주기 $\Lambda = 16.6 \mu\text{m}$, 0.5dB/cm 전파손실을 나타내는 Ti:PPLN에 대해서 측정된 2차 조화파 분포 특성이며, 입사광파의 1529.38 nm 파장에서 2차 조화파가 최대로 측정되었으며, 90.3(%/W)의 변환효율을 나타내었다. 이 경우에는 전파손실이 그림 9에 사용된 Ti:PPLN 보다 훨씬 커서 상대적으로 낮은 변환효율이 측정되었다. 따라서 Ti:PPLN 채널광도파로의 전파손실(또는 삽입손실)이 2차 조화파 생성 효율에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 z-축 분극 방향을 주기적으로 180° 위상을 바꾼 Ti:PPLN 채널 광도파로 제작 공정을 검토하고, 개선하였다. 분극반전 공정에 적합한 지그와 분극반전 프로그램을 고안하여 분극반전에 필요한 전하량을 계산하여 고전압 펄스의 인가와 전류량을 조절할 수 있도록 시스템을 구현하였다. ~1550 nm 대역의 ECL 파장가변 레이저를 이용해서 Ti:PPLN의 2차 조화파 생성을 확인하고, 세기를 측정하였다. 입사파장의 변화에 따른 조화파의 세기 분포는 예견한대로 sinc 함수와 유사한 형태를 보이고 있으나, 세기분포에서 관

찰되는 비대칭성 등은 반전주기와 분극반전 정도가 균일하지 못하기 때문에 나타나는 것으로 해석된다. 0.03 dB/cm, 0.5 dB/cm 전파손실을 갖는 Ti:PPLN 각각에 대해서 변환효율이 473(%/W), 90.3(%/W)로 측정되었으며, 따라서 Ti:PPLN 채널광도파로의 손실, 모드패턴 등이 매우 민감하게 변환효율에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

QPM 기반의 Ti:PPLN을 활용할 경우 2차 조화파 발생 이외에 전광파장 변환, 광 매개(optical parametric) 발생, 증폭 및 진동 등을 이용한 광원개발, 편광모드 변환 기반의 파장 필터 그리고 펄스 레이저를 이용한 테라헤르츠파 발생 및 검출 분야 등에 폭넓게 응용될 수 있다. 최근 들어서는 환경, 군사, 디스플레이 및 의료용 광원 구현에 이미 QPM 소자를 이용한 새로운 광원들이 선보이고 있으며, 이 분야에서 앞선 기술 선진국에서는 QPM 소자를 이용한 차세대 광원인 테라헤르츠파 광원을 개발하고 있다.

감사의 말

이 논문은 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

방문연구 및 소자 제작과 측정에 많은 도움을 주신 독일 패더본(Paderborn) 대학의 W. Sohler 교수님과 V. Quiring 연구원께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. Sohler *et al.*, "All-Optical Signal Processing in Periodically Poled LiNbO₃ Waveguide Structure," ECOC 2004 Proceedings, vol. 2, SEP. 2004.
- [2] W. K. Burns, W. McElhanon, and L. Goldberg, "Second Harmonic Generation in Filed Poled, quasi-Phase-Matched, Bulk LiNbO₃," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 252-254, 1994.
- [3] L. E. Myers, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 12, no. 11, pp. 2102-2116, 1995.
- [4] M. L. Bortz *et al.*, "Quasi-phase-matched optical parametric amplification and oscillation in periodically poled LiNbO₃ waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 49-51, Jan. 1995.
- [5] Yeung-Lak Lee *et al.*, "Wavelength selective single and dual-channel dropping in a periodically poled Ti:LiNbO₃ waveguide," *Opt. Exp.*, vol. 12, no. 4, pp. 701-707, Feb. 2004.
- [6] G. Schreiber *et al.*, "Efficient cascaded difference frequency conversion in periodically poled Ti:LiNbO₃ waveguides using pulsed and cw pumping," *Appl. Phys. B*, vol. 73, pp. 501-504, 2001.
- [7] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices* (Springer, 2003), pp. 26-32.
- [8] Yun-Lin Chen, Jing-Jun Xu, and Xiao-Jun Chen, "Domain reversion process in near-stoichiometric LiNbO₃ crystals," *Opt. Comm.*, vol. 188, pp. 359-364, 2001.
- [9] E. J. Lim, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Second Harmonic Generation of green light in periodically poled planar LiNbO₃ waveguide," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 174-175, 1989.
- [10] M. Yamada and K. Kishima, "Fabrication of periodically reversed domain structure for SHG in LiNbO₃ by direct electron beam lithography at room temperature," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 828-829, 1991.
- [11] J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Duccing, and P. S. Pershan, *Phys. Rev.*, vol. 127, pp. 1918, 1962.
- [12] Y. L. Lee *et al.*, "Periodical domain inversion in singlemode Ti:MgO:LiNbO₃ channel waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 15, pp. 812-813, July 2002.
- [13] V. Ya. Shur *et al.*, "Recent Achievements in Domain Engineering in Lithium Niobate and Lithium Tantalate," *Ferroelectrics*, vol. 257, pp. 191-202, 2001.
- [14] T. Suhara and M. Fujimura, *Waveguide Nonlinear-Optic Devices* (Springer, 2003), pp. 20-32.

Quasi Phase-Matched Second Harmonic-Wave Generation based on Nonlinear-Optic Effect Utilizing Ti:PPLN Optical Waveguides

Hongsik Jung[†]

Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Chochiwon-eup, Yeonki-kun, Choongnam 339-701, Korea

Youngsik Chung

Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon, Dowha-dong, Nam-ku, Incheon, 402-749, Korea

[†]*E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr*

(Received November 18, 2008; Revised manuscript December 18, 2008; Accepted December 19, 2008)

The characteristics of a ferroelectric-domain inverted grating fabricated by applying a high-voltage pulse at room temperature in Ti-diffused channel waveguides in z-cut LiNbO₃ (Ti:PPLN) were examined for channel waveguide quasi phase-matched second-harmonic generation devices. The fabrication conditions of uniform periodic domain-inversion were examined. Ti:PPLN with period $\Lambda=16.6 \mu\text{m}$ for SHG were fabricated and the performances were measured. A normalized SHG efficiency as high as 473 (%/W) was obtained with 49 mm interaction length.

OCIS codes: (130.3120) Integrated optic devices; (130.3730) Lithium Niobate; (190.4390) Nonlinear optics, integrated optics.