

주입 전하량의 실시간 제어에 의한 PPLN 제작 및 분극반전 과정 분석

권재영[†] · 김현덕 · 송재원

경북대학교 전자전기컴퓨터학부
④ 702-701 대구광역시 북구 산격3동 1370번지

(2006년 4월 17일 받음, 2006년 5월 3일 수정본 받음)

효율적인 PPLN 제작을 위하여 DC 전계를 인가하면서 LiNbO_3 에 인가되는 전압 및 전류를 실시간으로 측정할 수 있는 실험 장치를 제안하였다. 제안된 실험 장치를 사용함으로써 PPLN의 분극반전에 필요한 충분한 전하량을 공급하기 위한 전계인가시간을 수초 단위로 증가시킬 수 있어 LiNbO_3 에 주입되는 전하량의 조절을 용이하게 할 수 있었다. 또한 PPLN의 분극반전 과정을 단계별로 분류하고 각 단계별 실험결과를 바탕으로 분석함으로써 최적의 PPLN 제작조건을 구할 수 있었다.

주제어 : PPLN, LiNbO_3 , QPM.

I. 서 론

인터넷망을 통한 멀티미디어서비스와 HDTV등의 대용량 데이터 전송의 필요성이 증가함에 따라 고밀도 파장 분할 중화(Dense Wavelength Division Multiplexing: DWDM) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 DWDM 네트워크 시스템에서 효율적인 파장이용을 위한 파장변환기술은 핵심기술로 인식되고 있다. 특히 2차 비선형 효과인 차주파수발생(Difference Frequency Generation: DFG)을 이용한 파장변환방법은 데이터의 속도(Bit Rate)나 포맷에 영향을 받지 않고 넓은 파장변환 대역폭 및 우수한 잡음특성을 가지고 있어 현재 많은 연구가 이루어지고 있다.^[1]

차주파수발생은 비선형물질 내부로 입사된 각각의 광 신호들 간의 상호작용에 의해서 이루어지는데 이때 효율적인 차주파수발생을 위해서는 각 광 신호들 간의 파장차이로 인해 생기는 위상속도분산을 보상해야만 한다. 이를 위해 복굴절 위상정합(Birefringence Phase Matching)^[2], 모드분산 위상정합(Mode Dispersion Phase Matching)^[3] 및 준 위상정합(Quasi Phase Matching: QPM)^[4]등의 다양한 위상속도분산 보상방법들이 제안되었다. 이 중에서 준 위상정합 방법은 사용파장에 제한이 없고 특히 모드나 편광에 제한이 없어 각각의 비선형 물질에서 가장 우수한 비선형계수 성분을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 준 위상정합 방법의 기본원리는 비선형물질 내부에서 발생되는 차주파수 신호의 위상을 가간섭 길이(Coherence Length)의 두 배를 주기로 180° 변환시켜 지속적인 보강간섭을 일으키는 것인데 이를 위해 LiNbO_3 의 자연분극(Spontaneous Polarization) 방향을 이와 동일한 주기로 반전시킨 PPLN(Periodically Poled LiNbO_3)이 사용된다.^[5]

PPLN의 제작방법으로는 티타늄 내부 확산을 이용한 방법^[6], 양자교환을 이용한 방법^[7], 전자빔을 이용한 방법^[8], 외부 전계를 이용한 방법^[9]등이 제안되었다. 특히 1990년대 이후 상온에서 외부전계를 이용한 PPLN의 제작이 성공됨에 따라 이를 이용한 연구가 현재 많이 이루어지고 있다.^[10] 외부전계를 이용한 방법은 LiNbO_3 에 임계전압(Coercive Voltage) 이상의 전계를 인가하고 분극반전에 필요한 적당한 전하량을 주입함으로써 분극반전을 시키게 되며 이와 같은 조건을 만족시키기 위하여 고압의 펄스를 한번 또는 수차례 연속적으로 인가시키게 된다. 그러나 이러한 방법은 수십에서 수백 μs 의 짧은 인가시간을 가진 고압의 펄스를 사용하므로 LiNbO_3 에 인가된 전계의 크기와 주입되는 전하량의 정확한 측정 및 조절이 어려우며 제작된 PPLN의 분극반전 여부 및 반전된 영역의 duty ratio 등의 특성에 대한 예측 또한 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 외부전계로 펄스가 아닌 수초의 긴 인가시간을 가진 DC 전계를 사용하고 LiNbO_3 에 인가되는 전계와 주입되는 전하량의 실시간 측정 및 제어가 가능한 실험 장치를 제안하였다. 제안된 실험 장치를 사용함으로써 분극반전 과정 중 LiNbO_3 에 주입되는 전하량의 정확한 조절이 용이하여 효율적인 PPLN 제작이 가능하였다. 또한 PPLN의 분극반전 과정을 단계별로 분석함으로써 분극반전 과정 중 측정된 전압 및 전류 패턴을 이용한 PPLN의 특성예측이 가능하였고 이러한 결과를 바탕으로 최적의 제작조건을 구할 수 있었다.

II. LiNbO_3 의 분극반전

LiNbO_3 의 결정구조는 그림 1(a)와 같이 산소삼각형(Oxygen Triangle)과 리튬(Li), 나오븀(Nb) 이온 그리고 빈 공간

[†]E-mail: joyul@ee.knu.ac.kr

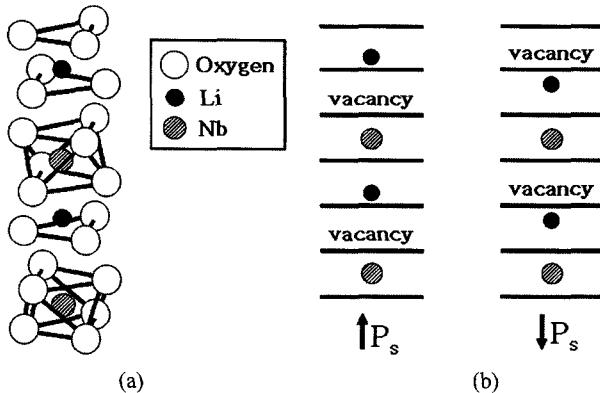


그림 1. (a) LiNbO_3 의 결정구조, (b) 리튬(Li)과 나오븀(Nb) 이온의 상대적 위치에 따른 LiNbO_3 의 분극방향.

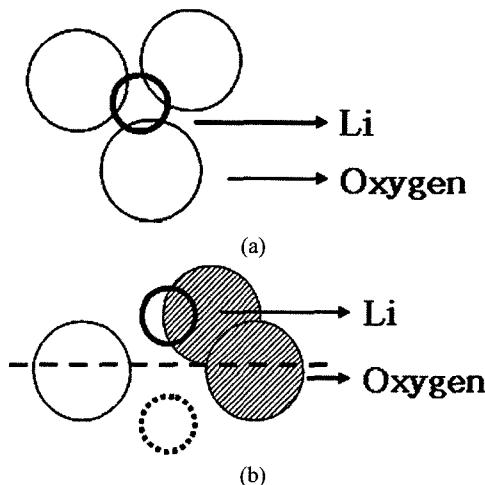


그림 2. (a) LiNbO_3 결정 내 산소삼각형과 리튬(Li) 이온의 상대적 크기, (b) 정상상태의 LiNbO_3 결정에서 산소삼각형과 리튬(Li) 이온의 위치(실선)와 임계전압 이상의 전계가 인가되었을 경우 준안정 산소분자(빗금) 및 리튬(Li) 이온의 위치(점선).

(Vacancy)으로 구성되어 있다.^[11] 여기서 결정의 자연분극 방향은 산소삼각형에 대한 리튬(Li)과 나오븀(Nb) 이온의 상대적 위치에 따라 결정되어지며 이에 따른 분극방향은 그림 1(b)와 같다. 이때 이온들의 상대적 위치는 외부에서 인가된 에너지에 의하여 리튬(Li) 이온이 산소삼각형을 통과하여 이동함에 따라 변화될 수 있다. 자연분극 방향을 바꾸는 가장 기본적인 방법은 LiNbO_3 를 큐리(Curie) 온도인 1140°C 이상으로 가열하여 상유전(Paraelectric) 상태로 만든 후 외부에서 전기장을 인가하여 리튬(Li) 이온을 이동시키는 방식이다. 이외에도 다양한 분극반전 방법들이 제안되었으나 고온의 조건을 유지해야 한다거나 제작된 분극반전 층의 단면이 고르지 못한 점 등이 단점으로 지적되어 왔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 상온에서 고압의 외부전계를 인가하여 분극반전을 시키는 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이 방법의 기본원리는 다음과 같다. 정상상태의 LiNbO_3 결정

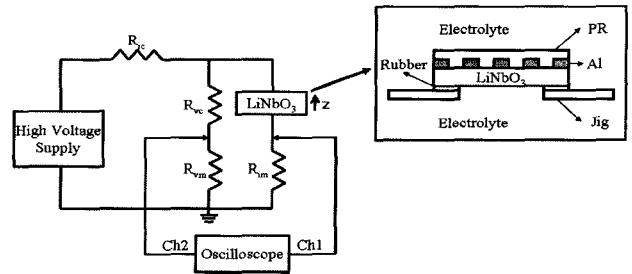


그림 3. PPLN 제작을 위한 실험 구성도 및 지그구조($R_{ic}=100\text{M}\Omega$, $R_{vc}=1.3\text{G}\Omega$, $R_{vm}=1\text{M}\Omega$, $R_{im}=430\text{k}\Omega$).

에서의 산소삼각형과 리튬(Li) 이온의 상대적 크기는 그림 2(a)와 같다. 이로 인해 정상상태에서 리튬(Li) 이온이 산소삼각형을 통과하여 이동하기는 불가능하다. 그러나 외부에서 임계전압 이상의 전계를 인가하게 되면 그림 2(b)와 같이 산소삼각형 중 빗금 친 두 개의 산소이온이 결합하여 준안정분자(Metastable Molecule)로 바뀌어 리튬(Li) 이온의 이동이 가능한 공간이 형성된다. 그리고 인가된 전계에 의해서 그림 2(b)의 실선으로 표시된 리튬(Li) 이온이 산소삼각형을 가로질러 점선으로 표시된 곳으로 이동되어 분극반전이 이루어지게 된다. 본 연구에 사용된 Congruent LiNbO_3 의 임계전압은 21kV/mm 이며 분극반전을 위해 필요한 전하량(Q)은 다음 식과 같다.^[12]

$$Q=2P_s A \quad (1)$$

여기서 $P_s[\text{C}/\text{cm}^2]$ 는 LiNbO_3 의 자연분극량(Spontaneous Polarization)으로 $71\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이고 $A[\text{cm}^2]$ 는 분극반전 영역의 넓이다.

III. 실험 및 결과 분석

3.1 주입 전하량의 실시간 제어에 의한 PPLN 제작

본 연구에서 PPLN 제작을 위해 구성한 실험 장치는 그림 3과 같다. 고전압발생기(High Voltage Supply), $R_{ic}(100\text{M}\Omega)$, $R_{vc}(1.3\text{G}\Omega)$, $R_{vm}(1\text{M}\Omega)$, $R_{im}(430\text{k}\Omega)$, 오실로스코프로 구성되며 고압의 전계를 효율적으로 인가하기 위해 사각형 내에서와 같은 특별히 고안된 지그를 사용하였다. 실험에 사용된 LiNbO_3 샘플은 Z -cut Congruent 타입이며 넓이 $1.5\text{cm} \times 1\text{cm}$, 두께 $300\mu\text{m}$ 이다. LiNbO_3 의 $+Z$ 면에 포토리소그래피 공정을 이용하여 주기 $20\mu\text{m}$ 의 Al 전극을 형성하고 이 후 Photoresist (AZ1512)를 스판 코팅하여 절연막을 형성하였다. 고무링을 이용하여 양 단면을 절연시켰으며 전계인가를 위해 전해액 (LiCl)을 사용하였다. LiNbO_3 의 분극반전에 필요한 조건은 임계전압(21kV/mm) 이상의 전계인가와 적당한 전하량을 주입하는 것이다. PPLN 제작 중 이러한 조건을 실시간으로 모니터링하기 위해 본 실험에서는 오실로스코프의 채널1을 통

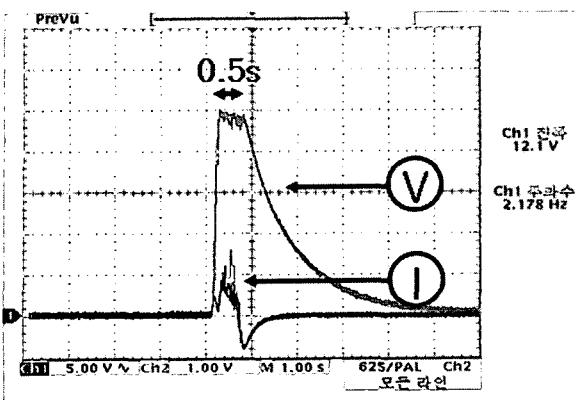
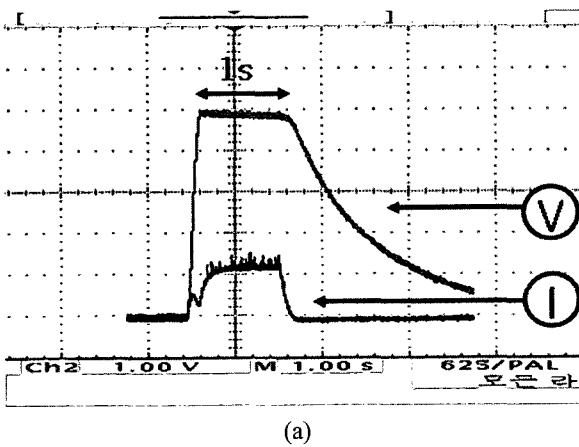


그림 4. LiNbO₃에 0.5초간 전계를 인가한 실험에서 측정된 전압 및 전류 패턴.

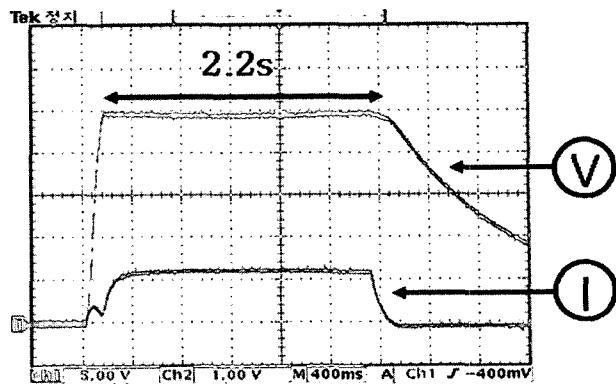


(a)

(b)

그림 5. (a) LiNbO₃에 1초간 전계를 인가한 실험에서 측정된 전압 및 전류 패턴, (b) 분극반전 패턴(+Z 면).

해 분극반전 중 LiNbO₃에 흐르는 전류를 측정하고 채널2를 통해 LiNbO₃에 인가된 전압을 측정하였다. 또한 제안된 회로를 사용하면 LiNbO₃에 흐르는 전류의 크기가 줄어들게 되어 분극반전에 필요한 전하량의 주입을 위한 전계인가 시간을 수초단위로 늘릴 수 있어 전하량 조절을 용이하게 할 수 있었다. 제작된 PPLN의 분극반전 패턴을 확인하기 위해 습식식각 방법을 사용하였다. HF:2HNO₃ 식각용액에서 LiNbO₃



(a)



(b)

그림 6. (a) LiNbO₃에 2.2초간 전계를 인가한 실험에서 측정된 전압 및 전류 패턴, (b) 분극반전 패턴(+Z 면).

의 +Z면에 비해 -Z면의 식각율이 월등히 크기 때문에 이를 이용하여 분극반전 패턴을 확인할 수 있다.

그림 4는 21.5kV/mm의 전계를 LiNbO₃ 샘플에 0.5초 동안 인가하고 2초간에 걸쳐 서서히 감소시킨 후 오실로스코프로 측정된 전압과 전류 패턴이다. ⑤는 전압 패턴을 나타내고 ①는 전류 패턴을 나타낸다. 전계 인가 후 LiNbO₃ 샘플을 80°C의 HF:2HNO₃ 용액에 10분간 식각한 후 광학현미경을 이용하여 +Z면의 분극반전 패턴을 확인하였다. 그림 4의 실험결과 분극반전에 필요한 충분한 전하량이 공급되지 못해 분극반전 패턴이 확인되지 않았다. 그림 5~그림 8은 각각의 샘플에 1초에서 6초까지 각기 다른 시간동안 전계를 인가하고 2초간에 걸쳐 서서히 감소시킨 후 오실로스코프로 측정된 전압과 전류 패턴(a) 및 분극반전 패턴사진(b)이다. 그림 5(a)는 LiNbO₃ 샘플에 1초간 전계를 인가하여 8.5μC의 전하가 주입된 경우이며 실험결과 그림 5(b)와 같이 분극반전이 시작되는 분극반전 핵형성(Nucleation) 과정을 확인할 수 있었다. 특히 가장자리효과(Fringe Effect)로 인해 주기적 구조를 가진 전극의 가장자리에 핵형성이 집중되는 것을 볼 수 있다. 그림 6(a)는 2.2초간 전계를 인가하여 27.9μC의 전하가 주입된 경우이며 그림 6(b)에서 분극반전이 진행되어 주기적 구조가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그림 7(a), 그림 7(b)는

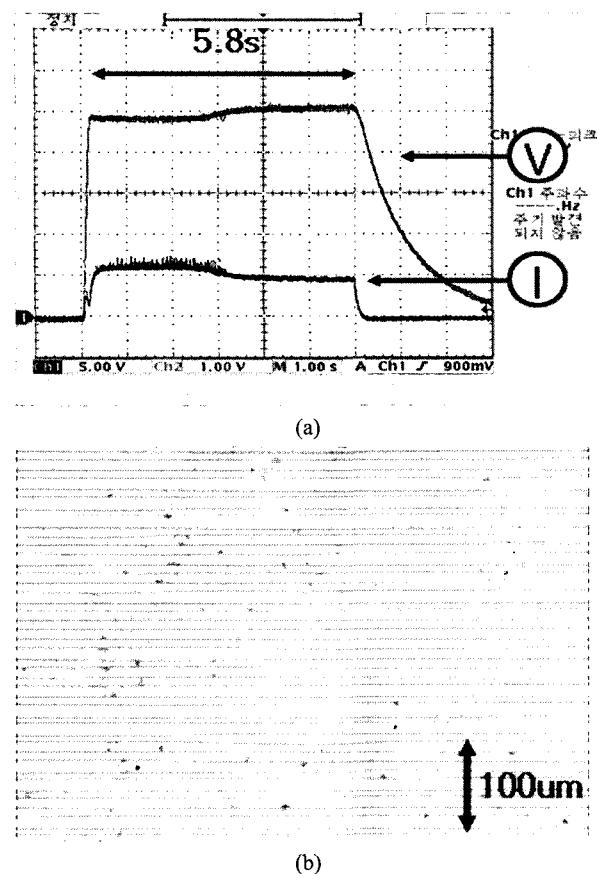


그림 7. (a) LiNbO₃에 5.8초간 전계를 인가한 실험에서 측정된 전압 및 전류 패턴, (b) 분극반전 패턴(+Z 면).

5.8초간 전계를 인가하여 $73.9\mu\text{C}$ 의 전하가 주입된 경우이며 주기 $20\mu\text{m}$ 의 PPLN 패턴을 확인할 수 있다. 그림 8(a)는 6초간 전계를 인가한 경우이며 그림 7의 실험과 비교했을 때 전계인가 시간은 유사하나 측정된 전압 및 전류 패턴에서 차이점을 확인할 수 있다. 그림 8의 실험은 전계인가 시작 후 5.5초되는 지점에서 전압 및 전류 패턴에 급격한 변화가 발생했으며 이 후 0.5초간 전계를 더 인가한 경우이다. 그림 7과 그림 8의 실험에서와 같이 전압 및 전류 패턴 상 급격한 변화가 발생하는 시점은 샘플에 따라 약간씩 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 8(b)는 주기구조의 전극이 형성된 영역과 형성되지 않은 영역의 경계지점을 보여주고 있는데 주기구조의 전극이 형성된 영역 내에서 근접한 분극반전 영역 간에 결합이 발생해서 주기적인 구조가 보이지 않음을 확인할 수 있다. 결과적으로 전압이나 전류의 패턴에서 급격한 변화가 발생되는 지점에 도달하기 전에 전계인가를 중단한 그림 7의 실험에서 가장 우수한 PPLN 분극반전 패턴을 확인할 수 있었다.

3.2 PPLN의 분극반전 과정 분석

본 연구에서 수행된 실험결과를 바탕으로 PPLN의 분극반전 과정을 단계별로 나누어 분석하였다. 그림 9는 PPLN의

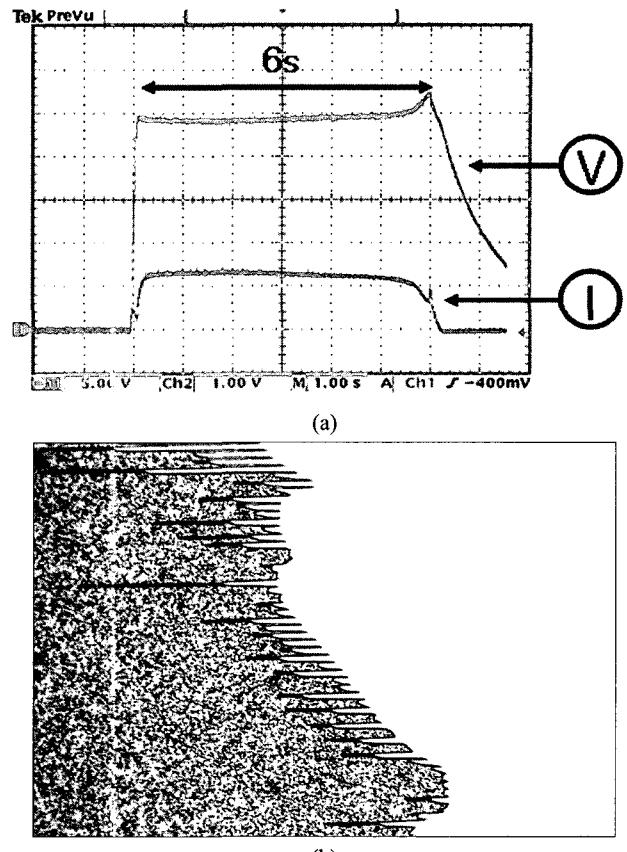


그림 8. (a) LiNbO₃에 6초간 전계를 인가한 실험에서 측정된 전압 및 전류 패턴, (b) 분극반전 패턴(+Z 면).

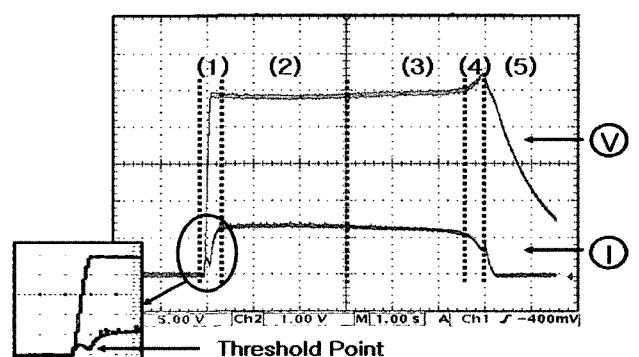


그림 9. PPLN 분극반전 과정의 단계별 분류.

분극반전 전과정을 보여주는 6초간 전계를 인가한 실험에서 측정된 전압 및 전류 패턴을 이용하여 분극반전 과정을 5단계로 분류한 그림이다. (1)단계는 분극반전이 시작되는 핵형성(Nucleation) 단계이다.^[13] LiNbO₃에 임계전압 이상의 전계가 인가되면 분극반전 핵이 형성되고 이를 중심으로 분극반전 영역이 확장되게 된다. 이 단계에서는 그림 9의 사각형 내의 확대된 영역에서 보는 바와 같이 인가전압을 증가시킴에 따라 전류가 조금 증가 후 감소되다가 LiNbO₃에 인가된

전압이 임계전압에 도달하게 되면 다시 전류가 증가하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이는 임계전압 이하의 전계가 인가될 경우 LiNbO_3 결정내부에 존재하는 결점(Defect)의 영향으로 제한적인 전하이동이 이루어진 후 바로 다시 정상상태로 되돌아오게 되나 LiNbO_3 에 인가되는 전계가 점점 증가하여 임계전압에 도달하게 되면 이때부터 분극반전이 시작되면서 전류가 다시 증가하게 되기 때문이다. 다양한 실험을 통해 그림 9의 (1)단계에서 보는 바와 같은 전류 패턴이 꺾이는 지점이 발생되지 않은 샘플일 경우에는 분극반전이 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 LiNbO_3 에 인가된 전계가 임계전압에 도달되지 않았기 때문이며 이러한 이유로 전류가 꺾이는 지점을 분극반전이 시작되는 Threshold Point로 볼 수 있다. PPLN 제작에 있어서 각각의 샘플에 따른 임계전압의 변동이나 지그의 절연문제 등으로 인해 분극반전이 재대로 이루어지지 않았을 경우 이러한 Threshold Point의 유무로 분극반전 여부를 간단히 판별할 수 있을 것이다. (2)단계는 (1)단계에서 형성된 분극반전 핵으로부터 분극반전 영역이 수평 및 수직방향으로 성장되는 단계이다. 전계인가 시간이 증가함에 따라 주입되는 전하량도 증가하고 따라서 분극반전 영역이 점차 확대되며 그림 6의 2.2초간 전계를 인가한 실험에서 이를 확인할 수 있다. (3)단계는 안정적으로 유지되던 전압 및 전류 패턴에 약간의 변화가 생기면서 시작되며 이러한 변화지점은 그림 7(a)에서 명확하게 확인할 수 있다. 이는 분극반전 영역에서 발생되는 내부전계(Internal Field)의 영향으로 분석해 볼 수 있다. 본 연구에서 사용된 LiNbO_3 샘플에서 전계인가를 위해 형성된 주기적 구조의 Al 전극의 넓이는 0.23cm^2 이다. 이 경우 식(1)에 의하여 계산된 분극반전에 필요한 전하량은 $32.7\mu\text{C}$ 이고 그림 9에서 전류 및 전압 패턴에 변화가 발생된 3초 지점까지 샘플에 인가된 전하량은 $36.3\mu\text{C}$ 으로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 본 연구에서 사용된 샘플의 경우 전계인가 후 3초 정도 후에 PPLN 제작에 필요한 충분한 전하량이 공급되어 전극아래 영역에서의 분극반전은 완료되고 이로 인하여 분극반전 영역에 형성된 내부전계의 영향으로 저항이 증가하여 전류량이 줄어들게 된다. 이후 전계를 계속 인가하더라도 (3)단계 동안은 절연막으로 인해 전극이 형성된 영역 이외의 영역으로 분극반전 영역이 확장되는 것이 억제된다. 그림 7의 실험에서 분극반전이 완료된 이후 5.8초까지 전계를 인가하더라도 PPLN의 주기적인 분극반전 영역이 그대로 유지되고 있음을 확인 할 수 있다. (4)단계는 전극이 형성되지 않은 부분 즉 절연막 아래 영역에서 분극반전이 시작되는 단계이다. 전극 아래 영역에서 분극반전이 완성되는 (3)단계 이후에도 계속해서 전계를 인가하게 되면 LiNbO_3 와 절연막의 계면에 전하가 누적되면서 절연막에 고압의 전계가 형성되어 절연파괴가 발생한다. 이로 인해 절연막 아래 영역에서도 분극반전이 이루어지게 된다. 이후 LiNbO_3 의 전영역에 걸쳐 분극반전이 이루어지면 더 이상 분극반전이 이루어지지 않아 그림 9의 (4)단계에서 보는 바와 같은 급격한 전압 증가와 전류

감소가 진행된다. (2)단계에서는 분극반전에 필요한 전하의 공급에 시간이 소요되어 분극반전이 서서히 진행되나 (4)단계에서는 이미 충분한 전하가 공급되어 있는 상태에서 순간적인 절연파괴에 의해 분극반전이 진행되므로 (2)단계에 비해서 아주 짧은 시간 내에 분극반전이 완성된다. 이 때문에 그림 8(a), 8(b)에서 보는바와 같이 전류 및 전압의 급격한 변화 후 즉 절연파괴 후 0.5초 이내에 바로 전계인가를 중단한 경우에도 분극반전이 전 영역에서 이루어져 주기적인 분극반전 패턴을 확인할 수 없었다. 결과적으로 최적의 PPLN을 제작하기 위해서는 절연파괴가 발생되기 전인 (3)단계 중에 전계인가를 중단해야함을 알 수 있다. 마지막 (5)단계는 모든 분극반전 과정이 진행된 후 고전압발생기의 출력을 강제로 중단시키는 단계이다. 이때 전계인가를 급격하게 중단할 경우 다시 분극반전 이전의 상태로 복귀되는 현상이 일어날 수 있으므로 반드시 수백ms 이상으로 서서히 감소시켜야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 효율적인 PPLN 제작을 위하여 DC 전계를 사용하면서 LiNbO_3 에 인가되는 전압과 전류를 실시간으로 측정하고 제어할 수 있는 실험 장치를 제안하였다. 제안된 실험 장치는 전계인가 시간을 수초 단위로 증가시킬 수 있어 PPLN 제작에 있어서 중요한 조건인 주입 전하량의 조절을 용이하게 할 수 있었다. 또한 제안된 실험 장치를 이용한 다양한 실험을 통해 PPLN의 분극반전 과정을 (1)핵형성(Nucleation) 단계, (2)전극 아래 영역에서의 분극반전 영역 확장 단계, (3) LiNbO_3 와 절연막의 계면에 전하 누적 단계, (4)절연막의 절연파괴에 의한 전영역에서의 분극반전 단계, (5)전계인가 종료 단계로 구분할 수 있었다. 그리고 각 단계별 실험결과를 바탕으로 PPLN의 분극반전 과정을 분석하였다. 분석 결과 PPLN 제작 중 측정된 Threshold Point를 통해 간단히 분극반전 여부를 판별할 수 있었고 LiNbO_3 에 인가된 전압과 전류 패턴을 이용하여 제작된 PPLN의 특성을 예측할 수 있었다. 또한 최적의 PPLN 제작을 위해 분극반전 과정 중 (3)단계 내에서 전계인가를 중단해야함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안된 실험 장치를 이용한 LiNbO_3 에 인가되는 전압 및 전류 패턴의 실시간 측정 및 전하량 제어를 통해 최적의 PPLN 제작이 가능하리라 기대한다.

참고문헌

- [1] Chang-Qing Xu, "QPM LiNbO_3 wavelength converters for optical communication applications," in *CLEO/Pacific Rim 2001*, Chiba, Japan, vol. 1, pp. I-444-I-445, 2001.
- [2] A. D. Rossi, V. Berger, G. Leo, and G. Assanto, "Form birefringence phase matching in multilayer semiconductor

- waveguides: tuning and tolerances," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, pp. 1293-1302, 2005.
- [3] C. Flueraru, and C. P. Grover, "Overlap integral analysis for second-harmonic generation within inverted waveguide using mode dispersion phase match," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 697-699, 2003.
- [4] Martin M. Fejer, G. A. Magel, Dieter H. Jundt, and Robert L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation: Tuning and Tolerances," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, pp. 2631-2654, 1992.
- [5] Lawrence E. Myers, and Walter R. Bosenberg, "Periodically Poled Lithium Niobate and Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, pp. 1663-1672, 1997.
- [6] E. J. Lim, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Second-harmonic generation of green light in periodically poled planar lithium niobate waveguide," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 174-175, 1989.
- [7] S. Makio, F. Nitanda, K. Ito, and M. Sato, "Fabrication of periodically inverted domain structures in LiTaO₃ and LiNbO₃ using proton exchange," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 3077-3079, 1992.
- [8] M. Fujimura, T. Suhara, and H. Nishihara, "LiNbO₃ waveguide SHG device with ferroelectric-domain-inverted grating formed by electron-beam scanning," *Elecron. Lett.*, vol. 28, pp. 721-722, 1992.
- [9] K. Kintaka, M. Fujimura, T. Suhara, and H. Nishihara, "High-efficiency LiNbO₃ waveguide second-harmonic generation devices with ferroelectric-domain-inverted gratings fabricated by applying voltage" *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 462-468, 1996.
- [10] M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, and K. Watanabe, "First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying and external field for efficient blue second-harmonic generation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 435-436, 1993.
- [11] P. W. Haycock and P. D. Townsend, "A method of poling LiNbO₃ and LiTaO₃ below T_c," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, pp. 698-700, 1986.
- [12] L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 12, pp. 2102-2116, 1995.
- [13] V. Y. Shur and E. L. Rumyantsev, "Domain kinetics in the formation of a periodic domain structure in lithium niobate," *Phys. Solid State*, vol. 41, pp. 1681-1687, 1999.

Fabrication of PPLN by Real-Time Control of a Transferred Charge and Analysis of Domain Inversion Process

Jai-Young Kwon[†], Hyun Deok Kim, and Jae-Won Song

School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, KOREA

[†] *E-mail: joyul@ee.knu.ac.kr*

(Received April 17, 2006, Revised manuscript May 3, 2006)

We proposed a PPLN fabrication setup that measures the voltage and current applied to LiNbO₃ in real time during application of a DC electric field. Because the duration for transferring a sufficient electron charge to LiNbO₃ increases, we are able to control the electron charge flow transferred to LiNbO₃ efficiently. We divided the domain inversion process of PPLN into 5 states: Nucleation (state 1), Spread of the domain inversion region under the electrode(state 2), Accumulation of the electron charge at the insulator/LiNbO₃ interface(state 3), Domain inversion under the insulator layer after breakdown(state 4), and Lowering the electric field applied to LiNbO₃ (state 5). We have found that the Threshold Point is essential for the domain inversion and that the domain inversion process must be stopped within state 3 for the optimum PPLN. Using these results, we could fabricate a stable and reproducible PPLN efficiently.

OCIS Codes : 130.3730, 160.3730, 190.4360.