

전하량 제어에 의한 주기적 분극반전 Ti:LiNbO₃ (PPLN) 제작 공정에 관한 연구

김원정 · 정홍식[†]

홍익대학교, 대학원, 전자전산공학과
Ⓣ 339-701 충청남도 연기군 조치원읍 신안동 300번지

이한영

전자부품연구원, 나노광전소자연구센터
Ⓣ 463-816 경기도 성남시 분당구 야탑동 68번지

(2005년 3월 30일 받음, 2005년 6월 8일 수정본 받음)

Ti 확산 리튬나오베이트 채널 광도파로의 z-축 분극을 주기적으로 180° 위상 변화시키는 Ti:PPLN 제작 공정을 검토하고, 개선하였다. 분극반전 공정에 적합한 지그와 Labview 프로그램을 이용하여 전하량 제어시스템을 고안하였다. 분극반전에 필요한 전하량으로부터 분극에 적절한 고전압 펄스와 duty-cycle을 조절하였으며, 분극에 필요한 임계 전압 보다 작은 전압을 인가한 상태에서 누설전류의 변화를 관찰하여 절연파괴 현상을 또한 최소화하였다.

주제어 : Nonlinear-optic effect, Periodic poled lithium niobate (PPLN), Quasi phase matching (QPM), All optical integrated optical devices, All-optical wavelength converter.

I. 서 론

오늘날 인터넷 사용량의 폭발적인 증가로 인해서 데이터 트래픽은 빠른 속도로 증가되고 있으며, 이러한 경향은 더욱 가속화될 전망이다. 따라서 최근 이러한 통신망의 환경 변화에 대응하기 위하여 초고속 대용량 광 네트워크 기술을 효율적으로 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 특히 광 네트워크의 초고속화를 위해서는 관련 부품들에 대한 전광(all optical) 기능들에 의한 초고속 특성들이 요구되는 추세에 있으며, 다양한 전광 부품들 중에서 전광 비선형 광집적 소자들이 그러한 시스템 구성에 있어서 매우 중요한 역할들을 수행하는 것으로 인식되어지고 있다.

한편 리튬나오베이트(LiNbO₃)는 높은 비선형 계수, $d = 17 \text{ pm/V}$ 를 보유하고 있으며, 결정의 길이가 90mm까지 사용 가능하며, 대형 단결정 성장이 가능하고 그리고 화학적으로 안정하기 때문에 주기적으로 분극 반전된 리튬나오베이트(PPLN: Periodically Poled LiNbO₃)를 이용한 비선형 전광 광집적 소자들(nonlinear all optical integrated optical devices)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2차 고조파 발생기(Second Harmonic Generator), 광 매개변수 발진기(Optical Parametric Oscillator), 광 매개 변수 증폭기(Optical Parametric Amplifier), 광 시분할 다중화기(Optical Time-Division Multiplexer), 파장 변환기(Wavelength Converter) 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 일반적으로 리튬나오베이트와 같은 비선형 결정들의 굴절률은 파장 분산 특성이

있기 때문에 기본파와 고조파의 유효굴절률이 같지 않아서 위상속도 차가 발생된다. 따라서 비선형 광학효과를 효과적으로 활용하기 위해서는 위상속도 분산(dispersion)을 보상해주는 것이 반드시 필요하다.

비선형 결정에서 자발 분극(spontaneous polarization)의 방향을 주기적으로 180° 반전시킨 구조에 의한 의사위상정합(QPM: Quasi phase matching)법은 교번 주기의 길이로 동작 파장 영역을 설정할 수 있기 때문에 의사위상정합을 비선형 결정에 적용하려는 시도는 비선형 광학 분야에서 중요한 주제로 발전 되어왔다. 특히 리튬나오베이트에 주기적으로 분극 반전된 교번구조를 적용시키기 위한 많은 방법들이 시도되었다. 그러한 방법들 중에는 리튬나오베이트 결정을 성장시키는 동안 분극 방향을 교번으로 바꾸는 방법,^[2] 표면에 불순물을 확산 시키는 방법,^[3] 전자빔을 이용한 방법,^[4] 그리고 근래에 제안된 리튬나오베이트 z 축면에 사진식각공정(photolithography)을 이용하여 전극을 형성하고 전기적 펄스를 인가하는 방법 등이 있으며, 후자와 같은 전계에 의한 분극 반전 방법에 연구가 집중되고 있다.

전계를 이용한 분극반전 공정에서는 고전압 펄스의 duty cycle과 횡수, 사진식각 패턴과 열처리 과정 그리고 분극 지그(zig)의 구조 등 매우 다양한 공정 파라미터들이 분극반전 도메인에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 전계에 의한 분극반전으로 리튬나오베이트의 위상속도 분산을 보상하기 위한 의사위상정합에 대해서 연구하였으며, 주기적 분극반전은 사진식각공정으로 전해액 전극(electrolyte electrode)을 형성하여 구현하였다.^[6,7] 이 과정에서 분극에 적합한 지그를 고안하였으며, 사진식각 공정의 열

[†] E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

처리 과정이 분극에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 Lab-View를 이용하여 분극반전 전류를 관찰 할 수 있는 회로를 구성하였고, 이러한 전류 변화를 통하여 하나의 전압 펄스를 인가했을 때 분극반전에 필요한 최적의 조건을 검토하였다.

II. 의사 위상정합(QPM)의 정성적 고찰

비선형 광학 현상이란 강한 레이저 광에 의한 전자기장과 매질과의 상호 작용에 따라 생기는 현상으로서, 강한 빛에 대한 매질의 응답이 비례(선형)하지 않는, 즉 비선형성이 나타나는 것이다. 이 때문에 제 2 고조파 발생(SHG : Second Harmonic Generation), 합 주파수 발생(SFG : Sum Frequency Generation), 파라메트릭 발진(OPG : Optical Parametric Generation) 등과 같은 비선형 현상들이 발생한다.

의사위상정합 조건하에서 광 주파수 혼합은 코히어런트한 광신호의 발생과 조작에 매우 효과적인 방법이다. 비선형 결정에서 차주파수 혼합(DFM : Difference Frequency Mixing), 광 파라메트릭 증폭(OPA : Optical Parametric Amplification) 과 같은 두 입력파의 혼합에 의한 새로운 광파의 생성은 광통신 시스템에서 광 신호 처리를 수행하거나,^[8-10] 분자(molecular) 감지^[11]와 같은 스펙트럼 분석을 수행할 수 있다. 하나의 강력한 펌핑 광원과 신호 광의 작용으로 발생하는 광 파라메트릭 발진^[12]과 광 파라메트릭 진동^[13,14]은 넓은 적외선 영역에 걸쳐서 발생된다는 장점을 갖고 있다.

비선형 결정의 자발 분극의 방향을 180° 교대로 반전시키는 의사위상정합은 교번 주기 길이에 의해 동작파장 영역을 설정할 수 있다. 그래서 요즘 LiNbO_3 , LiTaO_3 등의 단결정 기판에 형성된 광도파로에 위상정합 주기 구조를 접목시킨 SHG 소자의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이 원리는 1962년에 암스트롱에 의해 제안된 것이지만,^[15] 결정 내에 수 μm 정도 크기의 분극반전 주기를 형성하는 적절한 기술이 없었기 때문에 90년대 초까지 별로 활용되지 않고 있었다. Ti:LiNbO_3 광 도파로 제작 공정이 성숙해진 이후에, QPM

공정 기술로서 Ti 확산 방법이 주목을 받았고, 동시에 재료적인 문제점도 검토되었다. 광축면에 Ti를 확산하면 확산 영역만 자발분극의 부호가 반전된다는 것이 알려진 후 곧 이 현상을 이용하여 주기적 분극 반전된 SHG 소자가 개발되어 청색 레이저 변환 소자로 활용되었다.

일반적으로 비선형 결정의 굴절률은 파장 분산이 있기 때문에 기본파의 속도와 제 2 고조파의 속도가 같지 않으므로 위상차가 발생되며, 이 현상을 그림 1(a)에 도시하였다. 결정 안으로 입사된 기본파 $E = e^{i\omega t}$ 는 결정 안을 전파함에 따라 비선형 분극과 $P^{(2)}$ 를 구동시킨다. $P^{(2)}$ 에 의해 결정 안의 각 점들에서 발생한 제 2 고조파들은 각 고조파 간에 위상차를 발생시킨다. 그림 1(a)에서는 간단하게 하기 위해 $P^{(2)}$ 와 제 2 고조파의 위상차를 0으로 했다. 즉 점 A, B, C, ... 위치에서 발생한 제 2 고조파들은 조금씩 다른 위상을 갖고 전파되고 있으며, 결정의 끝 A에서 발생한 제 2 고조파와 F에서 발생한 제 2 고조파 사이에 위상차가 π 가 될 경우, 이 F까지의 구간을 코히런트 길이 l_c 로 정의되고, l_c 를 넘어서면 합성 고조파의 세기는 감소되며, 이 주기로 증감을 반복한다.

암스트롱의 제안은 l_c 주기마다 분극과 $P^{(2)}$ 의 위상을 반전시키면, 비선형 광학계수 d 의 부호도 반전된다는 것이다. 그림 1(b)는 위상 반전 개념을 나타낸 것이며, 점 F에서 제 2 고조파의 위상이 반전하여, l_c 에서 합성된 제 2 고조파의 위상을 보상하기 때문에 조화파의 세기가 떨어지지 않고 가산된다. 이 현상을 요약하면 그림 2와 같다. 빛의 전파 방향에 따라 코히런트 길이 l_c 주기로 비선형 광학계수 d 의 부호가 반전되어 궁극적으로 $2l_c$ 주기마다 제 2 고조파의 진폭은 증가하게 된다.

기존의 제 2 고조파 발생에서는 기본파와 분극파 사이의 위상을 정합시키기 위해서는 복굴절이 큰 결정을 사용하여 $n^{(2\omega)}$ 와 $n^{(\omega)}$ 를 같게 하는 굴절률 정합 방법을 사용했다. 이 경우에는 모든 점에서 발생한 제 2 고조파가 같은 위상으로

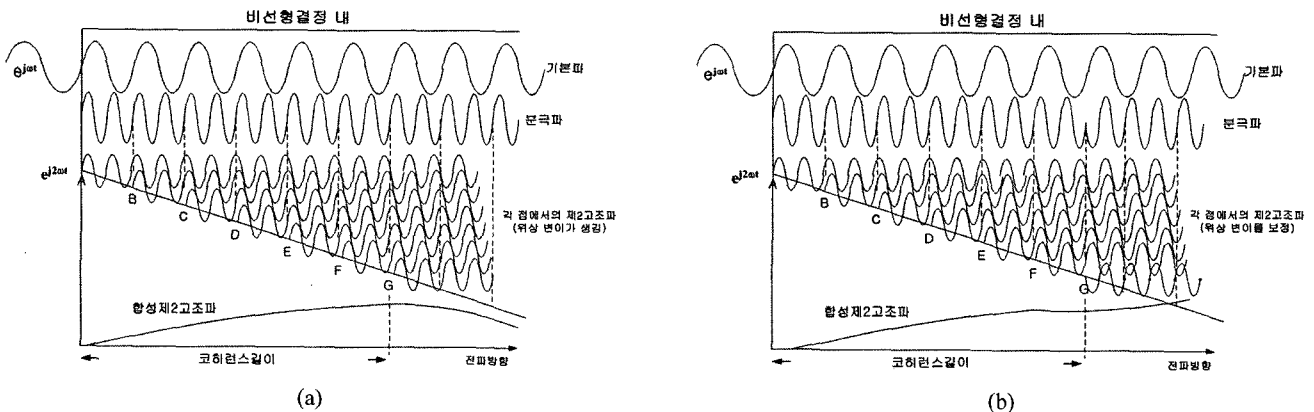


그림 1. 결정 내에서 기본파와 제 2 고조파의 위상 관계 : (a) 균일한 매질의 경우, (b) 비선형 분극계수 (d)를 반전시킨 경우.

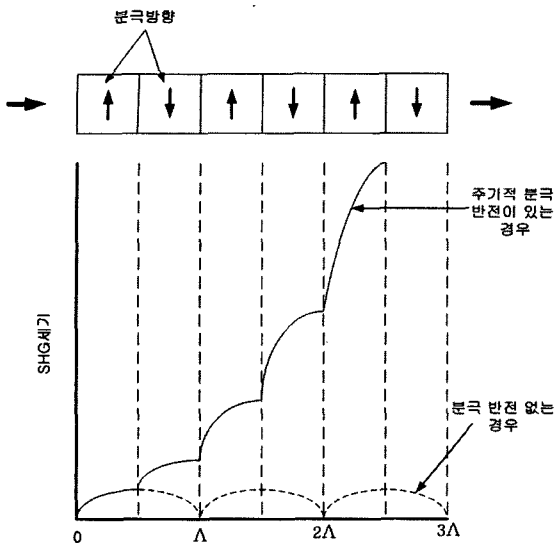


그림 2. 의사위상정합(QPM) 된 제 2고조파 세기의 변화.

전파한다. 이에 반하여 길이 l_c 마다 주기적으로 분극반전을 시킨 경우 비선형 분극파는 상쇄되지 않고 위상을 맞추게 되므로 “의사위상정합”이라고 불리는 것이다. 이 방법의 특징은 비선형 광학계수의 최대 성분을 활용할 수가 있고, 또 굴절률이 작은 결정에도 적용할 수 있다는 점이다. LiNbO₃의 가장 큰 비선형 광학계수는 d_{33} 이지만 전자와 같은 방법으로(벌크 결정에서) 위상정합을 성취하기 위해서는 d_{31} 을 이용할 수밖에 없지만, 그러나 QPM에서는 d_{33} 를 활용할 수 있다. QPM에서 분극반전 주기 Λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Lambda = 2ml_c \tag{1}$$

여기서 m 은 준 위상정합에서 교번 주기 Λ 가 몇 개의 코히런트 길이 l_c 로 이루어졌는지를 나타내는 차수이다. 한편 코히런트 길이 l_c 는 다음과 같다.

$$l_c = \frac{\lambda}{4\Delta n} = \frac{\lambda}{4(n^{(2\omega)} - n^{(\omega)})} \tag{2}$$

λ 는 입사파의 파장, $n^{(w)}$ 와 $n^{(2w)}$ 는 기본파와 제 2 고조파의 굴절률을 나타낸다. 비선형광학 계수 d 의 유효 값은 아래와 같다.

$$d_{eff} = \frac{2}{m\pi} d_{33} \tag{3}$$

따라서 차수 m 값에 의해 비선형 분극계수가 달라지고 변환효율도 달라진다. 보통 m 은 기수차가 이용되고, 분극반전 영역은 대칭적으로 된다. SHG의 변환효율은 기본파의 세기에 비례하고, 고 효율화를 위해서는 강한 기본파를 사용하게

된다. 이것은 광도파로 내에서의 파워 밀도를 높이고, 또한 긴 상호작용 길이를 갖게 하여 변환효율을 크게 한다.

III. Ti:LiNbO₃의 분극 반전 공정

본 연구에서는 고전압 분극반전 공정을 이용하여 상온에서 PPLN(Periodic Poled Lithium Niobate)을 제작하였다. PPLN 제작공정에 관한 연구는 국외 우수 연구 기관들에 의해서 진행되어 왔으며, 이와 관련된 국내의 체계적인 연구는 거의 전무한 상태이다.

두께 0.5 mm의 z-cut 리튬나오베이트 시편을 1.0×5.6, 4.0×2.0 cm² 크기로 준비하였다. 이때 균일한 감광액 두께를 얻기 위해 시편의 가장자리 부분을 연마하였다. 감광액 AZ4620P를 이용한 사진식각 공정에 의해 주기 $\Lambda=16.7 \mu\text{m}$, 두께 $5 \mu\text{m}$ 인 패턴을 구현할 수 있었다. 광도파로는 리튬나오베이트 웨이퍼 표면 아래에 제작되기 때문에 표면 상태를 청결하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 화학약품에 의한 표면상태의 오염 또는 손상은 PPLN의 전파 손실을 증가시키거나 원치 않는 위상부정합의 요소로 작용한다. 오염이나 표면의 손상은 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. PPLN 성능에 영향을 미치는 또 다른 요소는 소자의 전 길이에 걸쳐서 위상정합이 유지되어야 하기 때문에 광도파로의 특성을 균일하게 유지하는 것이 매우 중요하다.

PPLN 제작공정은 채널 광도파로 형성, 감광액을 이용한 전해액 전극의 패턴 형성, 그리고 높은 전압을 통한 분극반전 등 그림 3과 같은 단계들로 이루어지고 있다. z-축 LiNbO₃ 위에 e-beam 증착기를 이용하여 1000 Å 두께의 Ti를 사진식각 공정과 Ti 습식 식각 공정으로 $8 \mu\text{m}$ 폭의 Ti 채널 패턴을 형성한 다음, 1050°C 온도에서 8시간 동안 확산하여 $1.55 \mu\text{m}$ 파장 대역에서 동작하는 단일모드 채널 광도파로를 그림 3(a), (b)와 같이 제작하였다. 고온의 확산 과정에서 Li 원소의 외부확산(out-diffusion) 현상 때문에 나타나는 평면형 기생(parasite) 광도파로를 억제하기 위해서 wet-O₂ 분위기에서 확산을 수행하였다. 감광액 AZ4620P의 사진식각 공정을 통해서 분극 전극을 z-축 LiNbO₃의 +z 측면에 그림 3(c)와 같이 형성하였다. 감광액 AZ4620P는 높은 절연성을 가지고 있기 때문에 150°C의 온도에서 Hard-baking 되었을 때 절연체로서 좋은 특성을 보이고 있다. 감광액 전극 패턴의 선포는 이론적으로 필요로 하는 선포보다 약 $0.75 \mu\text{m}$ 정도 더 좁게 제작하였다. 높은 온도의 Hard-Baking 과정에서 감광액은 수축되며, 이러한 작용으로 이론적인 전극 폭과 실제 공정 후 전극 폭간에 오차가 발생되기 때문이다.^[7] 그리고 분극반전을 하기 전에 원하지 않는 초전효과(pyroelectric effect)를 피하기 위해서 감광액의 열처리 온도상승을 약 20~30°C/h 정도로 하였다. 최종적으로 분극반전 후

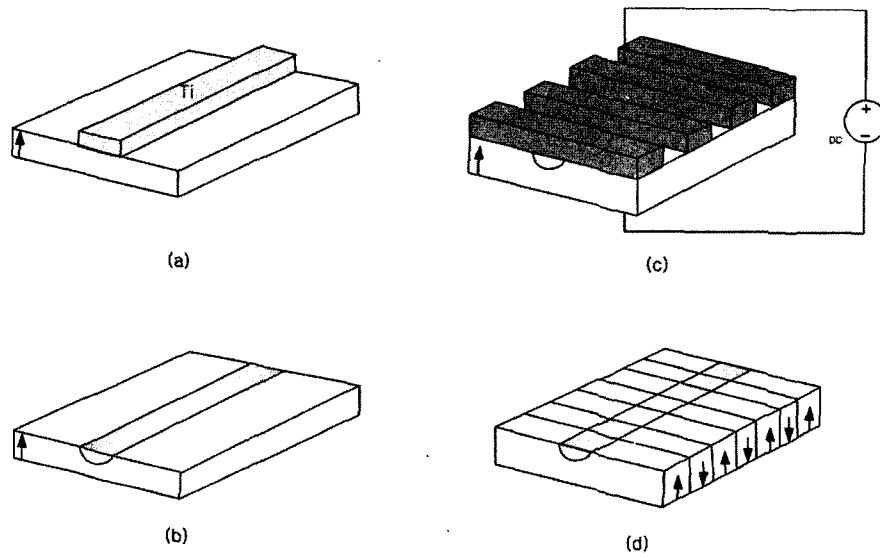


그림 3. PPLN 채널 광도파로 제작 공정 과정 : (a) Ti 채널 패턴, (b) Ti:LiNbO₃ 채널 광도파로, (c) 감광액 주기 패턴, (d) 분극 반전된 PPLN.

예상되는 패턴은 그림 3(d)와 같다.

그림 4는 분극 반전을 위해 고안된 지그에 LiNbO₃ 시편을 직접 장착한 모습을 보여주고 있다. AZ4620P 감광액으로 주기 격자를 형성한 LiNbO₃를 경계로 양쪽에 LiCl(lithium chloride) 전해질 용액을 채우고, 전해용액의 누설을 막기 위해 오링을 사용하였다. 그리고 고전압이 인가되었을 때 스파크가 생기는 것을 방지하기 위해 오링 바깥쪽으로 diffusion pump 오일을 채웠다. 제작된 지그를 이용하여 그림 5와 같은 분극반전 장치를 구성하였다. 1 mm, 0.5 mm 두께의 시편 각각에 분극반전에 필요한 임계 전압 이상의 약 22-23 kV, 11-12 kV 고전압을 인가하였으며, 고전압인가 직후 수 mA의 전류가 2-3초 흐르다가 분극반전이 완료되면 갑자기 전류가 매우 작아지는 현상이 관찰되었다. 자발분극의 방향을 바꿔주

기 위한 최소의 외부전압을 분극반전 임계 전압이라고 한다.

IV. 실험 결과 및 검토

그림 6은 분극 반전 실험 후 관찰된 시편의 표면 사진이다. 그림 6(a)는 1 mm 두께의 시편을 23 kV에서 약 3초 동안 분극 반전 실시 후 +z 면의 분극 반전된 영역의 경계 부분을 나타낸 것이다. 경계선을 중심으로 사진의 상단 부분이 분극 반전된 영역이다. 그림 6(b)는 분극 반전된 부분을 HF:HNO₃ (2:1) 용액에서 2시간 동안 식각시킨 후 +z 면에서 관찰된 것이다. 반전영역 경계선 근처에서 자라난 육각형 형태로 반전된 영역들이 관찰되었다.^[16,17] 그림 6(c)는 0.5 mm 두께의 LiNbO₃ 시편에 12.5 kV의 전압을 약 2초 동안 인가하여 얻은

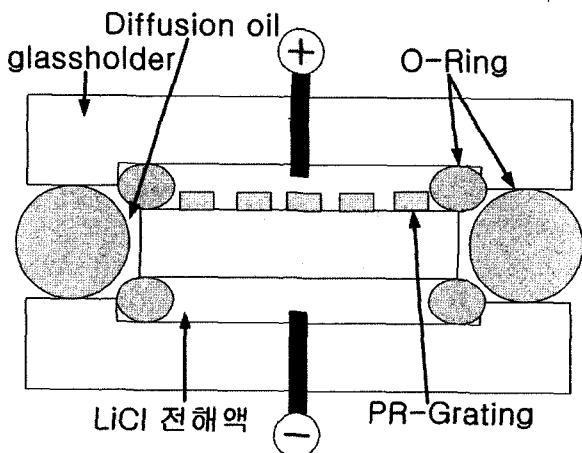


그림 4. 고전압 분극반전용 지그(zig) 구조.

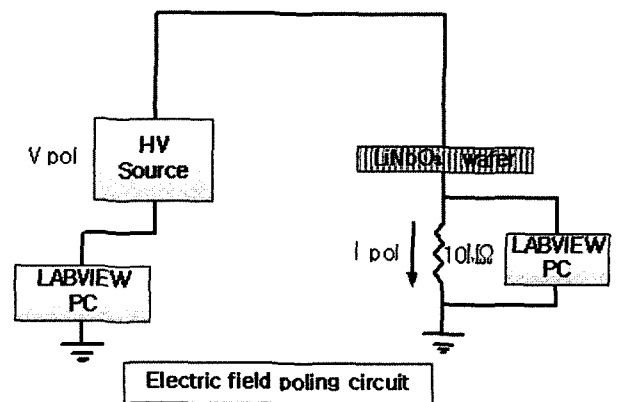


그림 5. Labview를 이용한 분극반전 시스템 구성도

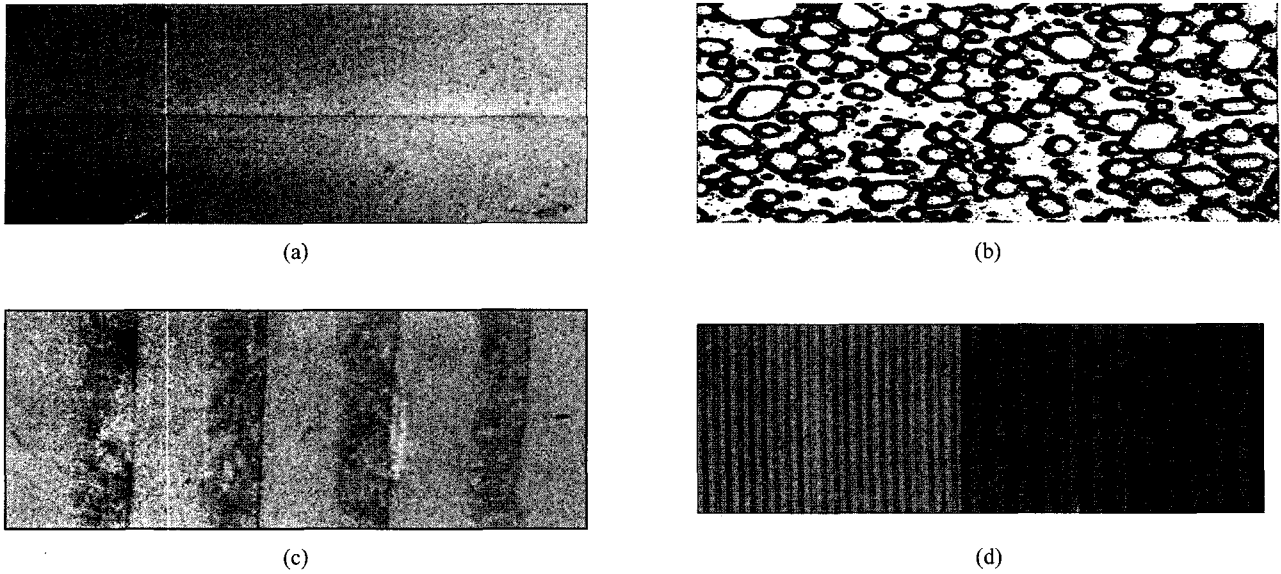


그림 6. 고전압 분극 반전된 LiNbO₃ 표면 확대 사진 : (a) 분극 반전된 표면, (b) 분극 반전후 식각된 표면, (c) 분극 반전된 표면 확대 사진, (d) 주기적으로 분극 반전된 표면.

분극 반전된 영역의 모습이다. 실험도중 절연파괴가 일어나서 시편이 파괴되었지만 현미경으로 관측한 결과 사진처럼 감광액의 패턴 모양대로 분극반전이 일어났다. 사진의 경계선은 분극반전 된 부분과 되지 않은 영역을 뚜렷이 구분하고 있으며, 감광액으로 형성된 패턴의 모양대로 분극반전이 깨끗하게 수행되지는 않았지만 분극반전이 일어났음을 알 수 있다. 실험 후 절연파괴의 원인을 찾아본 결과 실험적으로 확인된 것은 아니지만 전해액 투입 구멍으로 전해액을 넣어 줄 때 내부에 공기 기포가 발생되어 기포들을 통해 절연파괴가 일어날 수 있지 않나 추정된다. 그림 6(d)는 10 mm×56 mm×0.5 mm 크기의 LiNbO₃ 시편에 12.5 kV의 전압을 0.6초 동안 인가하여 분극 반전된 영역을 나타낸 것이다. 각각의 좌우 사진은 서로 다른 배율을 사용한 마이크로스코프 사진이다. 앞서 본 패턴 사진과는 다르게 영역의 경계선이 매우 뚜렷하나, 패턴의 duty cycle이 50%가 되지 않는 것을 관찰 할 수 있었다. 이는 0.6초 전압펄스가 시편을 완전히 분극반전 시키는데 필요한 전하량을 충분히 공급하지 못했음을 의미한다. 따라서 50% duty cycle을 만족하는 분극 반전을 수행하기 위해서는 더 긴 시간 동안의 전압 펄스를 인가하는 것이 필요하다.

분극 반전 실험은 강유전체의 자발분극의 방향을 바꾸어 주는 것이 목적으로서 이러한 목적을 달성하기 위해서는 고전압을 시편에 인가하여 주어야 한다. 높은 전압을 시편에 인가할수록 분극 반전은 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 과정에서 화학약품으로 인한 표면 오염, 리튬나오베이트 조성비의

불 균일 등에 의해 매우 민감하게 영향을 받는다. 또한 강유전체 고유의 성질인 초전현상으로 인해서 시편 내부의 전하 분포가 틀러지게 되는데, 이러한 전하분포의 불균형은 고전압을 인가했을 때 절연파괴가 일어나는 주요인이 된다. 본 연구에서는 초전현상을 줄여주기 위하여 30~60℃/hour의 상승 조건으로 150℃까지 온도를 올려 hard-baking을 수행하였고, 시편 내부의 전하들의 평형을 위해 알루미늄을 접지로 사용하였다.

강유전체의 절연을 파괴할 수 있는 절연파괴 전압이 분극 반전 임계 전압에 해당되는 전압보다 더 작은 경우에는 분극을 수행할 수 없다. 대표적으로 PbTiO₃가 이에 해당한다. LiNbO₃의 경우에는 절연파괴 전압이 분극반전 임계 전압보다 크므로 분극반전이 가능하다. 그리고 분극 반전 공정 중에 시편의 온도를 올려주게 되면 분극반전 임계 전압이 낮아져 더욱 낮은 외부전압으로 분극반전이 수행 될 수 있다. 그러나 시편자체의 절연저항이 매우 낮아지기 때문에 이것 역시 절연파괴의 원인이 될 수 있다.

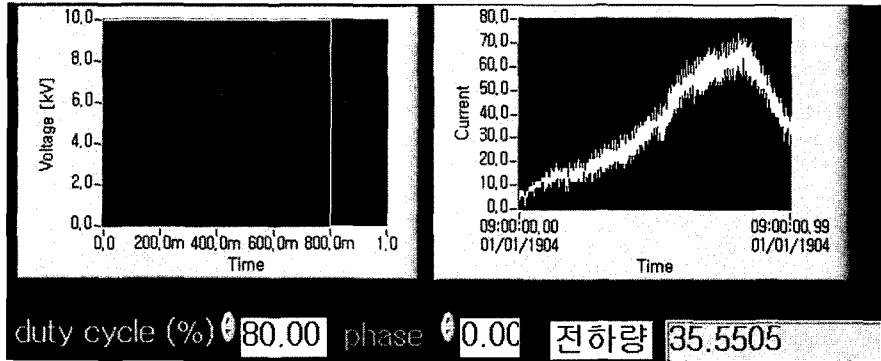
V. 분극반전 공정의 최적화

Labview를 이용하여 고전압 전원을 외부에서 구동하였고, LiNbO₃에 흐르는 전하량을 관찰할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. LiNbO₃의 자발분극은 약 78 μC/cm² 이므로 면적에 따른 전하량을 계산 할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 분극반전에 필요한 전하량을 얻기 위하여 LiNbO₃ 흐르는 전류를 Labview를 통하여 관측하면서 전압 펄스의 duty cycle을 조절하였고, 그림 5의 분극반전 장치에서 보는 것과 같이 10 MΩ의 저항과 LiNbO₃의 분극반전임계 전계를 감안하여 전압

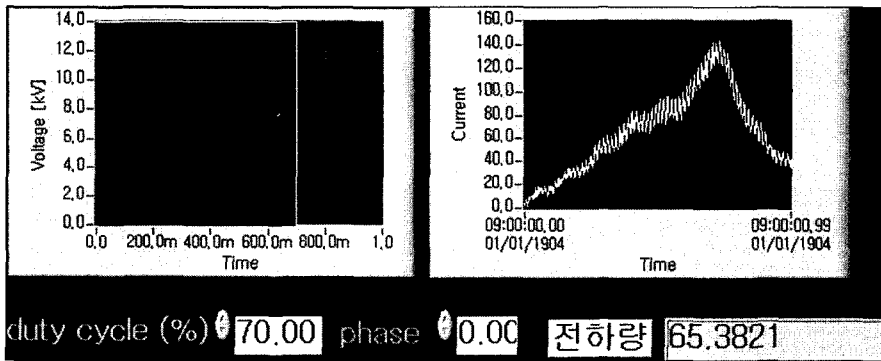
은 14 kV을 인가하였다. 한편 분극에 필요한 전압을 인가하기 전에 임계 전계 보다 작은 전압(10 kV)을 인가하여 그에 따른 전류의 변화 모양을 관찰함으로써 분극 반전 수행 시에 일어날 수 있는 절연 파괴나 지나친 분극 반전을 예방 할 수 있도록 하였다.

그림 7은 분극반전 실험 시 발생하는 누설전류의 영향이

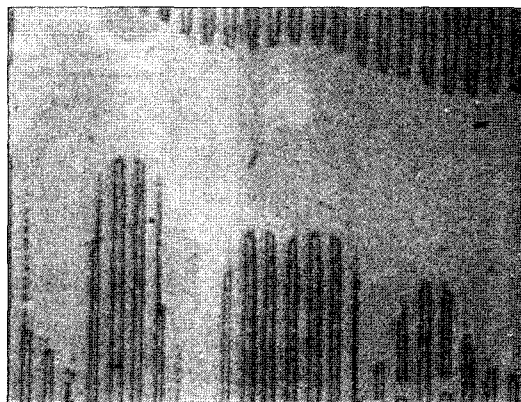
큰 경우, 전류 응답과 분극 반전 결과를 보여준다. 그림 7(a)는 분극반전 임계 전압 보다 작은 전압을 인가하였을 경우에 해당되는 전류 변화를 나타낸 것이다. 전류의 응답이 백색 잡음의 형태로 나오지 않고 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 경우에 그림 7(b)와 같이 고 전압을 인가할 경우 전압에 비례해서 누설전류가 전류 응답의 대부분을 차지하게 된다. 지



(a)



(b)



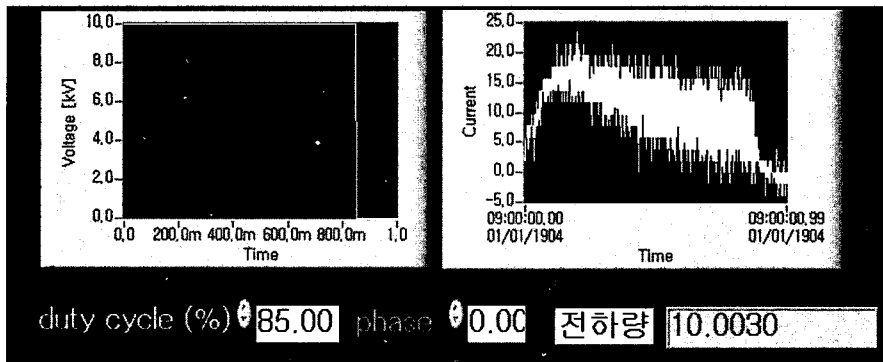
(c)

그림 7. 누설 전류가 큰 조건의 분극반전 시 나타나는 현상 : (a) 임계 전계 보다 작은 전계 인가, (b) 고전압 인가, (c) 분극 반전 영역의 표면 확대 사진.

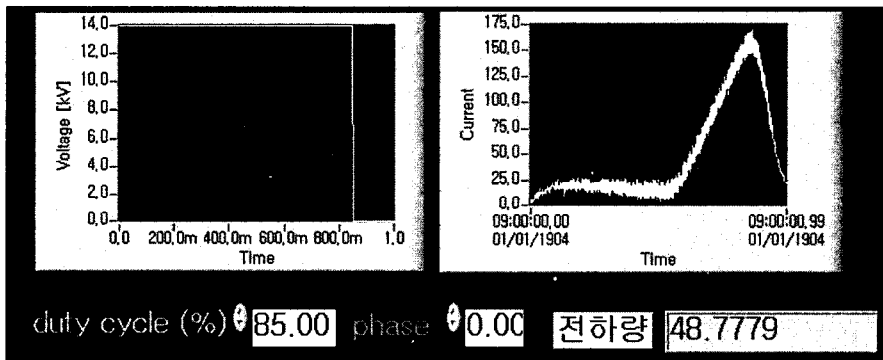
그에서 발생하는 누설 전류가 많을 경우에는 인가전압에 비례해서 누설전류가 발생하기 때문에 고전압 인가 시 발생하는 전류가 분극반전에 기여하지 못하게 된다. 즉 핵형성 (nucleation) 현상의 감소로 인해서 부분적인 분극반전이 일어나게 된다. 따라서 그림 7(c)와 같이 분극 반전이 일어나지 않거나 분극 반전된 부분이 불균일하게 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 고전압을 인가하기 전에 임계 전압 보다 작은 전압을 인가한 후, 누설전류

를 사전에 관찰함으로써 지그에서 누설전류가 최소가 되도록 하였다.

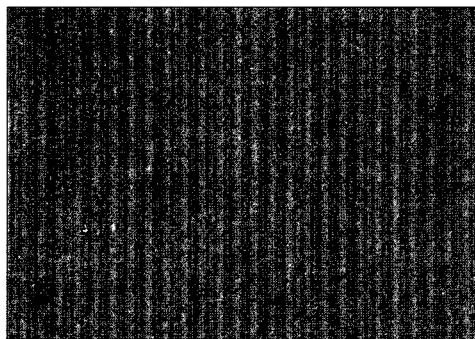
그림 8은 누설 전류의 영향이 작은 경우에 대한 전류 응답과 분극 반전 결과들이다. 분극반전 임계 전압 보다 작은 전압을 인가하였을 경우 백색잡음의 형태로 전류응답이 나타나고, 그림 8(b)와 같이 고전압을 인가하였을 경우 전류의 응답이 순간적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이 때 전류의 응답은 고전압 전원의 응답 속도의 한계로 인해 약 500 ms



(a)



(b)



(c)

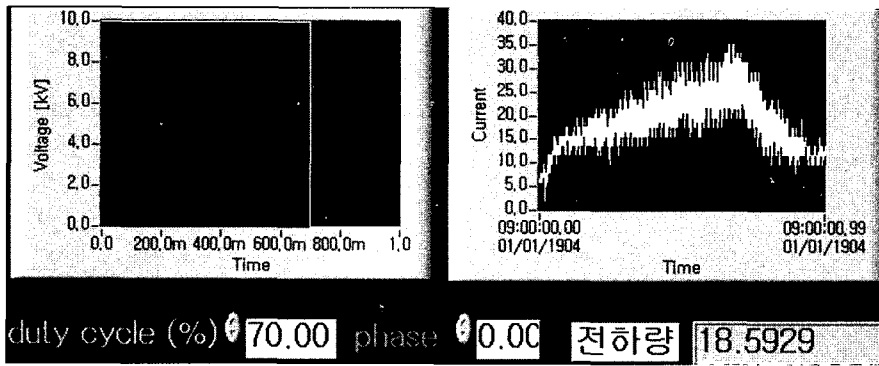
그림 8. 누설 전류가 작은 조건의 분극반전 시 나타나는 현상 : (a) 임계 전계 보다 작은 전계 인가, (b) 고전압 인가, (c) 분극 반전 영역의 표면 확대 사진.

지연 된 것을 알 수 있다. 이와 같이 누설전류의 영향이 작을 경우에는 그림 8(c)와 같이 분극 반전 영역이 균일하고, 표면 손상이 거의 없음을 알 수 있다. 그림 9는 Ti 확산으로 채널 광도파로가 형성된 리튬나오베이트를 분극반전 시킨 경우에 해당되는 전류응답과 분극반전 영역을 나타낸 것으로 그림 8과 비슷한 결과들을 보여주고 있다. 궁극적으로 본 연구에서는 Labview를 이용하여 전류의 변화를 통해 전하량을 측정 할 수 있었으며, 이를 통해 최적의 분극반전을 수행

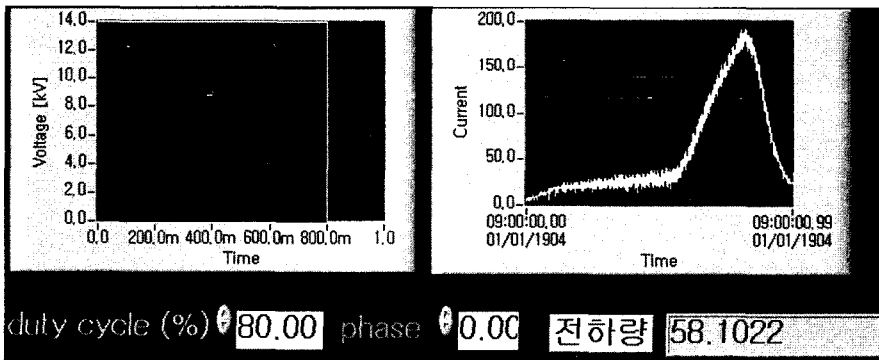
하기 위한 인가펄스의 duty cycle과 인가 횟수를 조절하였다.

VI. 결 론

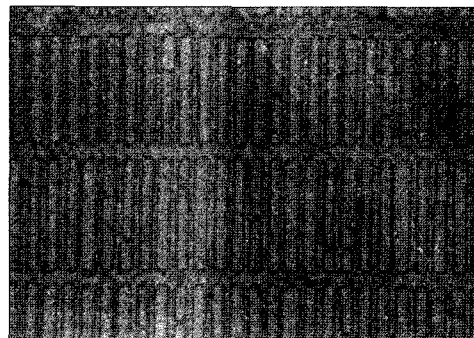
본 연구에서는 z-축 분극 방향을 주기적으로 180° 위상 변화시킨 Ti:PPLN 제작 공정을 검토하고, 개선하였다. 분극반전 공정에 적합한 지그와 Labview 프로그램을 이용하여 전하량 제어 시스템을 구현하였다. 분극반전에 필요한 전하량



(a)



(b)



(c)

그림 9. Ti:LiNbO₃ 채널 광도파로 분극반전 시 나타나는 현상 : (a) 임계 전계 보다 작은 전계 인가, (b) 고전압 인가, (c) 분극 반전 영역의 표면 확대 사진.

을 계산하여 고전압 펄스의 인가전압과 duty cycle을 조절하였다. 이를 통해 적절한 분극반전 조건을 찾을 수 있었고, coercive 전계 미만의 전압을 인가하고 누설전류의 변화를 관측함으로써 절연파괴 영향을 최소화하였다. 분극반전 영역은 식각을 통해서 관찰하였다.

분극반전 공정에서 중요한 것은 수반되는 모든 공정 과정에서 리튬나오베이트 시편의 특성이 변하지 않도록 유지하면서 공정을 진행하는 것이다. 시편 표면의 어떠한 오염이나 결점이 없도록 하고 시편 내부의 분극상태를 균일하게 유지하면서 공정을 진행하는 것이 중요하다. 그래야만 분극반전 실험 시 문제가 될 수 있는 요소들을 제거 할 수 있고, 높은 변환 효율을 얻을 수 있을 것이다. 만약 이러한 문제들을 감안하지 않는다면 분극반전 실험을 진행하는 동안 최적화된 공정 조건을 잡을 수 없을뿐더러, 고전압인가 시 시편이 쉽게 손상된다.

분극반전 실험은 강유전체의 특성을 이용하는 것이기 때문에 재료 자체의 특성을 잘 이해할 경우 분극영역의 확산 속도와 인가된 고전압 사이의 관계를 파악할 수 있다. 이러한 관계로부터 더 짧은 분극 영역의 주기에 대해 시편의 큰 영역에 걸쳐 반전영역의 duty cycle을 균일하게 유지할 수 있다. 실험을 통해 입력 전압과 입력전압의 크기에 따라 틀러지는 반전영역의 확산 속도를 감안하여, 입력 전압에 대한 가장 적절한 전압 펄스의 모양을 결정하고, 자발분극 변위에 따른 전류의 흐름을 파악하기 위하여 분극반전이 끝나는 시점을 정확히 파악하는 것이 또한 중요하다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 대학기초과제(03-기초-032)와 전자부품연구원의 유망 전자부품기술개발사업(Electro-0580)의 지원으로 수행되었으며, Labview 프로그램에 도움을 주신 전자부품연구원의 서용곤 연구원님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Yun-Lin Chen, Jing-Jun Xu, and Xiao-Jun Chen, "Domain reversion process in near-stoichiometric LiNbO₃ crystals", *Optics Communications* 188, 359-364, 2001.
- [2] W .K. Burns, W. McElhanon, and L. Goldberg, "Second Harmonic Generation in Filed Poled, Quasi-Phase-Matched, Bulk LiNbO₃", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6, 252-254, 1994.
- [3] E.J. Lim, M.M. Fejer and R.L. Byer, "Second Harmonic Generation of green light in periodically poled planar LiNbO₃ waveguide," *Electron. Lett.* 25, 174-175, 1989.
- [4] 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.* 27, 828-829, 1991.
- [5] M.J. Missy, S. Russel, V. Dominic, R.G. Batchko, "Real-time visualization of domain formation in periodically poled LiNbO₃," *Opt. Express* 6, 186-195, 2000.
- [6] L. E. Myers, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃", *J. Opt. Soc. Am. B/vol* 12, 11, 2102-2116, 1995.
- [7] G. D. Miller: Dissertation (stanford University 1998)
- [8] K. P. Petrov, A. T. Ryan, T. L. Patterson, "Spectroscopic detection of methane by use of guided wave diode pumped difference frequency generation," *Opt. Lett.* 23, 1052-1054, 1998.
- [9] S. J. B. Yoo, "Wavelength conversion technologies for WDM network applications," *J. Lightwave Technol.* 14, 955-966, 1996.
- [10] M. H. Chou, J. Hauden, and M. A. Arbore, "1.5 μ m band wavelength conversion based on difference frequency generation in LiNbO₃ waveguide with intergrated coupling structures," *Opt. Lett.* 23, 1004-1006, 1998.
- [11] T. Suhara, Hishizuki, and M. Fujimura, "Waveguide quasi phase matched sum frequency generation device for optical sampling," *ECIO'99*, pp. 501-504.
- [12] M. A. Arbore, M. H. Chou, M. M. Fejer, "380pJ threshold optical parametric generator in periodically poled lithium niobate waveguides," *ASSL'98*, PD paper.
- [13] M. A. Arbore and M. M. Fejer, "Singly resonant optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate waveguides," *Opti. Lett.* 22, 151-153, 1997.
- [14] D. Hofrman, G. Shreiber, C. Hasse, "Continuous wave mid infrared optical parametric oscillators with periodically poled Ti:LiNbO₃ waveguides," *ECIO'99*, Torino, Italy, PD paper.
- [15] J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Duccing and P. S. Pershan ; *Phys. Rev.*, 127, 1918, 1962.
- [16] V. YA. Shur, et al, "Regular Ferroelectric Domain Array in Lithium Niobate Crystals for Nonlinear Optic Applications," *Ferroelectrics*, Vol. 236, 129-144, 2001.
- [17] Simonetta Grilli, et al, "Investigation on reversed domain structures in lithium niobate crystals patterned by interference lithography," *Optics Express*, Vol. 11 No. 4, 392, 2003.

A study on the fabrication of periodically poled Ti:LiNbO₃ (PPLN) by the control of charge

Won-Joung Kim and Hong-Sik Jung[†]

Dept. of Electronic & Computer Engineering, Graduate School, Hong-Ik University,

Han-Young Lee

NANO Scale Quantum Devices Research Center, KETI

[†]*E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr*

(Received March 30, 2005, Revised manuscript June 8, 2005)

A fabrication process of periodic electric field assisted poling of Ti-diffused channel waveguides in LiNbO₃ (Ti:PPLN) has been developed and improved using a periodic 180° phase inversion along the z-axis. The zig for poling inversion and the Labview program of charge control have been devised. Pulse high voltage and duty cycle were adjusted based on the estimated charge required for poling inversion. Monitoring the change of leakage current under applied voltage less than the coercive voltage also minimized a breakdown.

OCIS Codes : 130.0130, 130.2790, 130.3060, 130.3120, 130.3730.