

## 1. 준위상정합의 간단한 역사

준위상정합(quasi-phase matching; QPM) 기술은 레이저가 발명된 지 얼마 지나지 않은 1962년 Bloembergen 등에 의해 처음 제안되었다[1]. QPM 기술을 이용하기 위해서는 물질이 갖는 비선형광학 계수를 결맞음 길이마다 반전시켜야 하는데, 마이크로미터 단위의 구역 반전 구조 실현의 어려움으로 인해 연구가 제한적으로 수행되어 왔다. 여기서는 강유전성 결정에 한정하여 QPM 기술의 간단한 역사를 소개하고자 한다.

1982년 중국의 남경대학의 Ming 그룹에서 단결정을 성장시키는 과정에서 첨가하는 불순물의 농도 변화를 통해서  $\text{LiNbO}_3$ (LN)의 분극반전에 성공한 이후[2], 1991년 미국 스탠포드대학의 Byer 그룹에서  $\text{CO}_2$  레이저를 사용하여 laser-heated pedestal growth 방법을 통해 5%

정의 낮은 재현성과 공정의 어려움으로 주기의 불균일성이 심하고, 분극반전이 제대로 된 유효길이가 대략 1-2 mm 정도로 제한되어 QPM 소자가 널리 응용되지는 못하였다.

그러나 1990년대 초반에 들어 photolithography 기법을 강유전체의 주기적 분극반전에 도입함으로써 전기장을 이용한 분극반전법이 확립되고, 비선형성이 매우 큰 LN 단결정에 적용되면서 준위상정합 비선형광학 분야는 눈부시게 발전하기 시작하였다. 반도체 IC patterning 공정에 사용되는 photolithography 기술은 매우 성숙된 기술로 당시 sub- $\mu\text{m}$  평면 구조를 쉽고 안정되게 만들 수 있었다. LN 단결정에서 VIS-NIR 영역의 비선형광학 상호작용에 요구되는 전형적인 QPM 주기(즉, grating 주기: coherence length의 2배)는 수~수 십  $\mu\text{m}$ 이므로, photolithography 기술은 분극반전을 위한 전극구조 형성

# 특집 ┃ QPM 소자기술

## 준위상정합 비선형광학 소자의 연구 현황

차명식\*, 유난이\*\*

$\text{MgO}$ -doped  $\text{LiNbO}_3$  rod 내에 2~6.3  $\mu\text{m}$  주기로 분극이 반전된 결정을 제작하여 약 2 W 정도의 녹색광을 2차조화파 발생(SHG)을 통해서 얻었다[3]. 1989년 같은 그룹에서 Ti-indiffusion 방법으로 평판 도파로형 PPLN(periodically poled lithium niobate) 시료를 제작하여, 연속발진의 녹색 광을 SHG으로 얻었는데, 당시로는 획기적으로 높은 변환효율인 5%/Wcm<sup>2</sup>를 보고하였다[4]. 이 외에도 1990년 금속 마스크(Ti-mask) 등을 이용한 ion exchange 방법으로 도파로형 PPKTP(periodically poled  $\text{KTiOPO}_4$ )를 제작하여, 녹색과 청색광을 발생시키는데 성공하였다[5]. 그러나 이러한 방법들은 모두 제작과

에 쉽게 적용될 수 있었다. 이렇게 제작된 QPM 소자는 mask에 의해 QPM 주기가 안정적으로 정의되므로 이전의 여러 가지 방법으로 제작된 소자에 비해 매우 효율적이고 재현성 있게 제작할 수 있었다[6]. Photolithography 기술을 사용한 전기장 분극반전법의 확립은 LN의 매우 큰 비선형광학계수 텐서 성분인  $d_{33}$ 의 사용과 함께 비선형광학 매질로서 PPLN의 응용 분야를 크게 넓혀 주었다. 통상적인 복굴절 위상정합으로는  $d_{31}$  등의 비대각(off-diagonal) 성분만 사용 가능하나, LN에서는  $d_{33}$ 이  $d_{31}$ 에 비해 5배 이상 크므로 QPM에서  $d_{33}$ 의 사용은 산술적으로 조화파 발생 효율을 25배 이상 증가시킬 수 있음을 의미

\* 부산대학교 물리학과

\*\* 광주과학기술원 고등광기술연구소

## 준위상정합 비선형광학 소자의 연구 현황

한다. (실제 사용할 수 있는 효율은 이의 절반 정도 임.) PPLN은 위에서 언급한 미국 스탠포드대학 Fejer 그룹의 집중적인 연구 이후 다양한 레이저 광원에 대해 SHG, OPO(optical parametric generation) 등으로 수많은 연구가 뒤따랐으며, 세계적으로 많은 연구그룹들이 준위상정합에 관련된 다양한 매질의 강유전 물성 연구, 이를 이용한 소자 제작, 그리고 응용 연구에 매진하고 있다[7-17]. 최근에는 LN, LT(LiTaO<sub>3</sub>), KTP 등의 재료를 바탕으로 하여 QPM 소자를 주문 제작 및 판매하는 회사도 여러 곳 있으며, 국내 수요도 증가하고 있는 추세이다[18-21].

QPM 소자의 가장 대표적인 쓰임은 SHG와 OPO 등 주파수 변환소자일 것이다. 이들은 UV에서 Mid-IR, 나아가서는 THz 파에 이르는 넓은 영역에서 매우 높은 효율을 자랑하며, 다른 소자들로는 불가능했던 응용을 가능하게 했다. QPM 소자의 실제적인 응용은 레이저 파장변환을 이용한 디스플레이, fine spectroscopy, 광통신용 파장변환, 극초단 펄스의 증폭, 대역폭이 큰 전기광학변조, Solc filtering 등 매우 다양하며, 앞으로 domain-engineering을 통한 새로운 응용도 기대할 수 있다. 그러나 이러한 응용 분야를 개척하거나 그 범위를 넓히기 위해서는 보다 나은 QPM 소자의 제작 및 관련 재료의 연구 개발이 꾸준히 있어야 할 것이다.

## 2. 분극반전의 물리와 QPM 비선형광학

강유전체는 흔히 '자석'이라고 부르는 강자성체의 전기적 대응으로 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 강유전체는 자발분극(spontaneous polarization)을 가지며, 항전기장(coercive field) 보다 큰 전기장을 가하면 자발분극의 방향을 바꿀 수 있다. (그러나 강유전체가 자석처럼 물체를 끌어당기지 않는 이유는 주위의 전하가 끌려와 자발분극에 의한 표면전하를 항상 중화시키고 있기 때문이다.) 자발분극의 반전은 위에서 언급한 다양한 방법으로 구현이 가능하지만 상온 또는 고온(약 300~400 K)에서 전기장을 걸어주어 분극반전을 시키는 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 강유전 분극반전은 한 개 혹은 모든 결정축을 반전시키는 효과를 가져 오히려 분극반전된 구역(domain)의 선형 광학적인 성질(여기서는 굴절률)은 변하지 않지만,

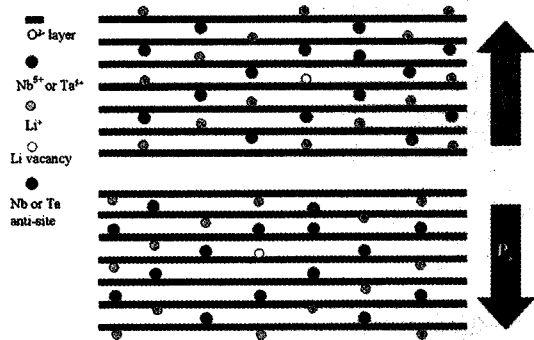


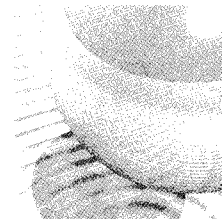
그림 1. LN(LT) 결정구조와 분극반전시 결정 내 이온들의 재배치에 관한 모델

전기광학계수와 비선형광학계수 등의 3계 텐서의 성분들은 크기를 유지하면서 부호를 바꿀 수 있다. 즉 유효 전기광학(비선형광학)계수의 부호가 분극이 반전된 구역에 따라 변조된 셈이다. 이는 위에서도 간단히 언급했듯이 입사한 기본파와 상호작용하는 광파들 사이의 위상결맞음, 즉 위상속도를 의도적으로 맞추기 위해서 결맞음 길이(coherence length)에 해당하는 길이마다 비선형계수의 부호를 역전시키는 것이다.

LN과 LT는 공간군 R3c의 삼방정계로서 대칭점이 없으며, 비선형광학계수가 커서 QPM 소자로 가장 많이 쓰이는 결정이다. 그림 1은 LN 혹은 LT의 단결정 구조와 분극반전시 변화하는 이온들의 배치를 도식적으로 표시한 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 Nb<sup>5+</sup> (Ta<sup>5+</sup>) 이온이 산소층에 대해서 아래에 위치했다가 분극반전을 하게 되면 산소층 위로 재배치하게 된다. LN(LT)은 원료인 Li<sub>2</sub>O와 Nb(Ta)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 이상적 화학조성(stoichiometric) 비인 1:1로 용액을 만들더라도 결정 성장 시 Li이 5% 정도 결핍된 congruent LN(CLN) 결정이 자연적으로 만들어진다. CLN 결정에서는 이러한 원천적 결함(Li vacancy 혹은 Nb(Ta) anti-site 등)이 전하의 뒤틀림으로 작용하여 매우 큰 내부장(internal field)을 보인다. CLN의 항전기장은 21 kV/mm 정도로 매우 큰데, 이는 원천적 결함에 의한 내부장이 대부분이다[22]. (결함을 줄인 near-stoichiometric LN(SLN)의 경우 항전기장은 0.4~1 kV/mm 정도로 매우 작다.)

분극반전은 주로 전기장이 상대적으로 강한 전극의 모서리에서 시작된다. 일단 결정의 +분극면에 있는 전극의



모서리에서 분극이 반전된 핵(nucleation)이 형성되고, 여기서부터 -면으로 (자발분극의 반대 방향으로) 반전이 곧바로 전파된다. 그 다음으로는 항전기장 이상에서 가해주는 전하량(=전류×시간)에 따라 반전된 강유전 구역벽이 확장되어 나간다. 주기적인 분극반전에서 특기할만한 점은 전극구조의 주기에 비해 결정 wafer의 두께가 10~100 배 정도로 매우 크다는 것이다. CLN의 경우 구역벽은 자발분극에 상당히 평행하게 형성되므로 이렇게 큰 두께/주기 비율에도 별 문제가 일어나지 않는다. 그러나 다른 물질의 경우 일반적으로 구역벽들이 경사를 가지도록 만들어져 QPM 소자의 성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

다음은 주기적으로 분극반전된 결정에 입사하는 기본파와 상호작용하는 파들 간의 상호작용이 위상정합 조건에 따라 어떻게 달라지는가를 SHG를 예로 들어 간단히 설명하고자 한다. 그림 2에서  $l_c$ 는 결맞음 길이,  $P_S$ 는 자발분극,  $I_{2\omega}$ 는 이차조화파의 세기이다. 결맞음 길이마다 분극반전된 구조에서 이차조화파의 세기(B)는 위상부정합 경우(C)와 비교하여 비선형계수의 부호반전으로, 줄어 들어갈 이차조화파의 세기가 다시 역전되어 상승함을 각각의 분극반전된 구역에서 볼 수 있다. 이와 같은 준위상정합 기법은 기존에 쓰이는 복굴절에 의한 거의 완벽한 위상정합과 유사하게 이루어진다고 하여 준위상정합 혹은 의사위상정합이라고 불리고 있으며, 조화파 발생 효율은 위상정합에 비하여 분극반전에 의해서 새롭게 도입된 유효 비선형계수,  $d_{\text{eff}} = (2m/\pi) d_{33}$ 에 의해서 결정된다. 여기서는  $m = \pm 1$ 인 제 1차 QPM의 경우에 대해서만 한정해서 논의하였다.

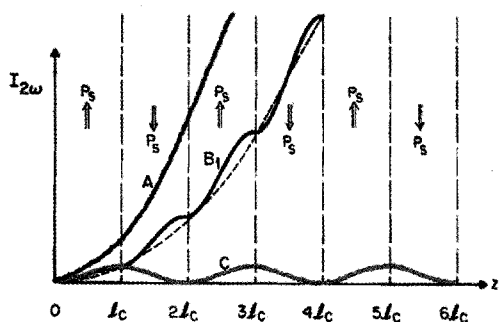


그림 2. 이차조화파 발생시 파의 진행길이에 따른 이차조화파 세기 (A: 위상정합, B1:제1차 준위상정합, C: 위상부정합 경우)<sup>6)</sup>

본 절에서 언급한 비선형광학적 특성의 변화 외에도 주기적 분극반전의 기초가 되는 강유전 물성에 관한 연구가 한국, 러시아, 중국, 일본, 대만 등의 연구자들에 의해서 꾸준히 진행되어 오고 있다(23-24). 분극반전의 물리학과 QPM 소자의 구체적인 응용 등은 뒤이어 실린 논문에서 보다 상세히 소개되어 있다.

### 3. 준위상정합 소자제작 과정 및 새로운 강유전체의 개발

상온에서 전기장 폴링법을 이용한 준위상정합 소자제작은 크게 두 가지로 대별될 수 있다. 첫째로 덩어리 결정을 그대로 이용하여 제작하는 방법과, 두 번째로 도파로 형태의 구조에 분극반전을 시키거나 혹은 분극반전을 먼저 수행하고 난 후 도파로 구조를 만드는 것이다. 본 절에서는 두 방법 모두에 공통으로 쓰이는 기본적인 QPM 소자의 제작 공정에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

그림 3에서 살펴 볼 수 있듯이 우선 어떤 광학 결정을 사용할 것인지에 따라 원하는 목적에 맞게 전극 형성용 마스크를 설계하게 된다. PPLN을 예로 들어보면, SHG나 합주파수발생 등 광주파수 상방전환 과정으로 VIS-UV를 얻을 경우에는 분극반전 주기가 10  $\mu\text{m}$  이내로 마스크가 설계되고, 차주파수 발생 등 하방전환으로 적외선-근적외선의 저주파수 생성의 경우에는 20  $\mu\text{m}$  대로 상대적으로 주기가 큰 마스크를 설계한다. 따라서 정확한 분산식은 QPM 주기의 결정에 매우 중요하다. 그러나 두 경우 모두 사용될 결정의 분산에 의해 계산된 실제 주기에 비해서 전

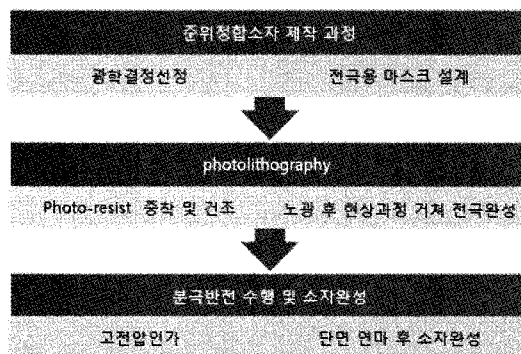


그림 3. QPM 소자 제작과정

극으로 작용할 부분의 면적은 약 25~50% 정도로 줄여서 설계하게 되는데, 이는 위에서 언급했던 분극반전 과정 중 강유전 구역벽(domain wall)이 1:1로 될 때까지 분극 영역이 확장되는 과정을 감안하여 전극의 넓이가 좁은 것이 대체로 유리하기 때문이다.

그 다음에 강유전체 wafer의 +면 위에 photoresist 막을 형성하고, 제작된 마스크를 통해 UV 광에 노광시킨다. 노광 부위를 현상액으로 녹여내면 wafer +면 위에 photoresist 부도체 격자구조가 형성된다. Wafer의 양면을 모두 전해질 포화 수용액으로 채우고, 이를 전극으로 사용하여 직류 전기장으로 액체전극 접촉부에서부터 분극반전을 일으킨다. 그 이후 반전된 구역의 확장 범위는 외부에서 가해주는 전하량으로 적절히 제어한다.

QPM 소자 제작에 가장 많이 사용하고 있는 CLN 결정은 지름 3~4 인치, 두께 0.5~1 mm의 wafer 형태로 상용화되어 있다. CLN의 경우 앞에서 언급한 것과 같이 원천적 결함으로 인하여 항전기장이 약 21 kV/mm로 매우 크므로 실제로 poling 가능한 두께가 약 1 mm 정도로 제한되고 있다. CLN은 광유도 굴절률 변화(photorefractivity)에 의한 광 손상이 잘 일어나므로 작은 개구(aperture)는 고출력이나 intra-cavity 응용 등에 매우 불리하다. 따라서 항전기장을 낮추어 두꺼운 QPM 소자를 제작하려는 연구가 여러 그룹에서 진행되어 왔다. CLN에 적당량의 MgO를 첨가하여 성장시킨 Mg:CLN 결정은 Li 결정에 기인하는 원천적 결함이 상당히 줄어들어, 항전기장이 낮은 동시에 광 손상도 적다는 연구결과가 알려져 있다. 최근 일본의 Taira 그룹에서는 이를 이용하여 두께 5 mm의 Mg:CLN을 분극반전시킨 QPM 소자를 보고한 바 있다 [25].

또한 일본의 물질과학연구소(NIMS)의 Kitamura 그룹은 CLN과 CLT의 원천적 결함의 농도를 낮추기 위해 이상적인 화학조성비에 가까운 stoichiometric LN, LT(SLN, SLT)의 결정성장 연구를 30여 년간 계속해 왔다. 이들은 최근 개발에 성공한 SLN과 SLT wafer를 판매할 뿐만 아니라 이들을 소재로 한 두꺼운 PPSLN 및 PPSLT 소자를 주문제작하고 있다 [26].

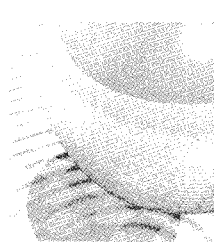
LN 뿐만 아니라 KTP 결정도 항전기장이 4~5 kV/mm로 상대적으로 낮아서 스웨덴의 왕립공대 Laurell 그룹에서는 두께가 1~2 mm인 PPKTP 소자를 제작하여 활발한 연구를 하고 있다 [27].

#### 4. 준위상정합의 새로운 응용분야

전통적인 복굴절에 의한 위상정합은 물질의 선형흡수가 없는 파장영역에서 상호작용하는 파들 사이의 결맞음으로 결정된다. 이 조건은 매질의 분산에 의존하고, 분산은 다시 불순물 첨가나, 구조의 변화 등의 결정성장 과정에 의해서 결정되기 때문에 다양한 주파수 변환이나 비선형과정 선택에 한계를 보이고 있다. 그러나 준위상정합 방법은 분극반전의 구역 크기를 결맞음 길이에 준하여 디자인하고 이를 제작과정에서 잘 구현 한다면 기존의 방법으로 실현하지 못했던 새롭고 흥미로운 빛들의 상호작용을 만들어 낼 수 있다. 구체적인 예를 몇 가지 들자면, 중국 남경 대학의 Zhu 박사팀에서는 특이한 구조의 PPLT를 제작하여 레이저 디스플레이에 사용이 가능한 1 W 이상의 적색, 청색, 녹색광 동시 발생을 선 보였다. 이는 하나의 소자에 여러 가지 QPM 주기를 분포시키는 domain engineering 기법 중 하나로, 복굴절에 의한 위상정합으로는 불가능한 것을 하나의 소자에서 구현한 것이다 [28].

PPLN의 펄스초 영역의 빠른 펄스의 주파수변환 응용에서는 물질이 갖는 급격한 분산 때문에 결정의 길이는 대개 1 mm 이하로 제한되고 있다. 이러한 문제를 chirped QPM 기법을 이용하여 격자의 주기를 점점 증가 혹은 감소시키고, 특정한 부분에 기존의 주기와 다른 주기를 혼용함으로써 주파수 대역이 넓은 빠른 펄스의 흥미로운 상호작용이 가능하다는 것을 미국 스탠포드대학 Fejer 그룹이 보고하였다 [29]. 뿐만 아니라 보다 복잡한 domain engineering으로 약한 신호광으로 강한 입사광을 제어할 수 있는 all-optical modulation 응용도 제안되었다 [30].

본 저자들은 물질의 분산을 잘 이용하면 QPM 대역폭 확장도 특정한 주기를 갖는 소자제작을 통해서 가능하다는 연구결과를 보고했다 [14]. 이러한 대역폭 확장은 거시적인 공명 제어의 일환으로 볼 수 있는데, 물질 개발로 미시적인 공명을 바꾸는 것에 비해 domain engineering으로 매우 쉽게 공명의 모양을 설계하는 것이 그 특징이다. QPM 대역폭 확장은 fs-pulse의 SHG나 증폭 [31]뿐만 아니라, 극 초단-극 미세 세계를 연구하는 펄스초 레이저의 응용범위를 확대하는 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.



## 5. 국내 연구현황 및 발전 전망

국내의 비선형광학에 대한 연구 환경을 연구집단과 테마별로 간략히 살펴보면 다음과 같이 크게 대학과 정부출연 연구소로 나눌 수 있을 것이다. 대학으로는 부산대학교에서 국내 처음으로 1998년 이 분야에 대한 연구가 시작되었는데, 유전체물성연구소와 모스크바 대학과의 상호교류 프로그램에 의한 러시아 과학자의 방문이 계기가 되었다. 모스크바 대학에서는 앞서 소개한 전기장 poling 법이 아닌, Czochralski 방법으로 LN 결정을 성장시키면서, 온도 구배를 주어, 이에 따른 불순물의 농도 변조를 이용하여 주기적 분극반전을 구현하였다. 당시의 시료는 Mg와 Nd가 co-doping된 PPLN으로 평균 주기가 4.8  $\mu\text{m}$  이었고, 색소레이저에서 나오는 파장 956 nm의 기본파를 청색광으로 SHG 하였는데, 23.3 %의 변환효율을 얻었다 [32]. 그러나 이 PPLN 시료는 특유의 poling 방법에 의해 주기의 안정성이 매우 좋지 않았으므로 더 이상 연구가 진행되지 못했고, 대신 앞서 설명했던 photolithography에 바탕을 둔 상온 전기장 poling의 표준적인 방식을 채택하게 되었다. 부산대에서는 최근에는 넓은 QPM 대역폭을 갖는 효율적인 파장변환 소자를 설계/제작하고 특성을 분석하는 쪽으로 연구를 계속 이어가고 있다.

KAIST의 윤춘섭 교수 연구실에서는 2002년 항전기장이 550 V/mm 정도로 매우 낮은  $\text{KNbO}_3$ 을 주기적으로 분극반전시킨 PPKN으로 SHG를 통해서 녹색광을 얻었고 [33], KTP의 isomorph인 RTA를 매우 작은 주기로 분극반전하여 역시 SHG로 효율적인 UV 발생에 성공하였다 [34]. 이 외에도 아주대학교, 서강대학교 등에서는 준위상정합 소자를 주문제작으로 구입하거나 공동연구로 시료를 확보하여 새로운 레이저 광원 개발 및 극초단 펄스의 증폭 연구를 진행하고 있으며, 단국대학교, 홍익대학교 등에서도 준위상정합 소자 제작에 관심을 기울이고 있다.

연구소로는 광주과학기술원 고등광기술 연구소에서 준위상정합 소자제작 전용 클린룸을 갖추어 소자제작을 하고 있으며, 최근에 OPO, OPG 뿐만 아니라 새로운 THz 발생용 광원으로 PPLN, PPSLT 등의 소자를 이용하는 연구를 꾸준히 수행하고 있다 [35, 36]. 또한 한국전자부품연구원에서는 오래도록 연구해온 electro-optic modulator 기술을 확장하여 도파로형 소자를 LN에서 제작하는데 역량을 집중하여 최근에는 건식 에칭방법으로

성능이 우수한 도파로 개발에 성공하여 녹색 및 청색광 발전에 꾸준히 매진하고 있다 [16].

끝으로 국내의 QPM 소자 기반의 비선형광학 연구의 전망을 개략적으로 살펴보면, QPM 연구회가 지난 2006년도에 발족되어 약 80여명의 대학, 연구소, 기업 등의 연구자들이 매년 정기적인 연구교류를 하고 있다. 매년 1월에 개최되는 준위상정합기반 비선형광학 워크숍은 이들이 다 함께 모여 연구정보를 공유하고 공동연구의 기회를 여는 좋은 기회를 주고 있다. 그러나 아직도 국내의 연구 환경은 이웃나라인 일본이나, 중국, 대만, 미국 그리고 유럽 등에 비해서 매우 열악한 상황이다. 우선 준위상정합 소자기반 연구의 저변확대가 무엇보다 시급하다고 본다. 이 분야의 활발한 연구를 위해서는 꾸준한 관심과 획기적인 비전을 대학 실험실과 연구소에서 미래 과학자인 대학원생들에게 보여줘야 한다고 생각된다. 전반적으로 인기가 없는 물리학 쪽의 상황을 고려해 볼 때, 그래도 선진국에서는 광학에 대한 필요성을 인지하고 있고, 이 때문에 이 분야에서도 전문가들이 꾸준히 배출이 되고 있다. 우리나라도 이러한 관심과 투자가 절실히 요구된다.

국내 여건의 또 다른 문제는 기본 재료(강유전성 단결정)의 부족이다. 분극반전의 기반이 되는 모든 강유전성 결정 wafer는 외국에서 수입하고 있다. CLN은 그나마 값이 비싸지 않고 poling 기술이 잘 알려져 있는 결정이라서 어려움이 없으나, 앞서 소개한 일본 무기재료연구소(NIMS)의 SLN, SLT 등은 값이 비싸고, poling이 까다롭다고 알려져 있다. 특히 주문 제작된 PPSLN 및 PPSLT는 매우 비싸서 다수의 소자를 구입하여 시행착오를 반복하는 실험을 하기에는 어려운 점이 있다. 원하는 특성을 가진 광학매질을 개발하기는 쉽지 않으나, 장기적인 안목으로 새로운 광학매질 개발에 투자하지 않으면 항상 재료를 선진국에서 구하여 쓰다가 연구/개발에서 앞서나가지 못하는 악순환이 반복될 수밖에 없다. 선진국에서는 이미 QPM 소자를 채용한 레이저들이 시장에 나오고 있다. 이는 준위상정합 기술이 기초연구에서 이제는 또 다른 가치를 창출하는 응용연구로 옮겨가고 있음을 시사한다.

준위상정합 기술 각 분야에 대한 보다 상세한 내용은 본 특집에 소개된 다음 글들을 참고하기 바라며, 본 기고에서 소개를 다 하지 못한 내용들을 참고문헌으로 대신하고자 한다.

참고문헌

(1) J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing and P. S. Pershan, Phys. Rev. 127, 1918 (1962).  
 (2) N.-B. Ming, J.-F. Hong, and D. Feng, J. Mater. Sci. 17, 1663 (1982).  
 (3) D. H. Jundt, G. A. Magel, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Appl. Phys. Lett. 59(21) (1991).  
 (4) E. J. Lim, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Electron. Lett. 25, 3 (1989).  
 (5) C. J. van der Poel, J. D. Bierlein, J. B. Brown, and S. Colak, Appl. Phys. Lett. 57, 20 (1990).  
 (6) M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, and R. L. Byer, IEEE J. Quant. Electron. 28, 11 (1992).  
 (7) S. Matsumoto, E. J. Lim, H. M. Hertz, and M. M. Fejer, Electron. Lett. 27, 22 (1991).  
 (8) S. Kurimura, Nonl. Opt. 8, 191-204 (1994).  
 (9) J. Saikawa, M. Miyazaki, M. Fujii, H. Ishizuki, and T. Taira, Opt. Lett. 33, 15 (2008).  
 (10) Y. Zhang, Z. Qi, W. Wang, and S. N. Zhu, Appl. Phys. Lett. 89, 171113-1 (2006).  
 (11) T. Hatanaka, K. Nakamura, T. Taniuchi, H. Ito, Y. Furukawa, and K. Kitamura, Opt. Lett. 25, 9 (2000).  
 (12) V. Shur, E. Romyantsev, and S. Makarov, J. Appl. Phys. 84(1), 445 (1998).  
 (13) H. Kim, L. Jankovic, G. Stegeman, M. Katz, S. Carrasco, and L. Torner, Appl. Phys. Lett. 81(15), 2710 (2002).  
 (14) N. E. Yu, J. H. Ro, M. Cha, S. Kurimura, and T. Taira, Opt. Lett. 27, 12 (2002).  
 (15) K. Mizuuchi, T. Sugita, K. Yamamoto, T. Kawaguchi, T. Yoshino, and M. Imaeda, Opt. Lett. 28, 15 (2003).  
 (16) H. M. Lee, W. S. Yang, W. K. Kim, H. Y. Lee, W. J. Jeong, S. W. Kwon, K. H. Koo, and M. G. Song, J. Opt. Soc. Korea, 19, 3 (2008).  
 (17) S.-N. Zhu, Y.-Y. Zhu, and N.-B. Ming, Science, 278 (1997).  
 (18) <http://www.opt-oxide.com>  
 (19) <http://www.hcphotonics.com>  
 (20) <http://www.crystaltechnolog.com>  
 (21) <http://www.ntt-at.com>  
 (22) V. Gopalan, T. E. Mitchell, Y. Furukawa, and K. Kitamura, Appl. Phys. Lett. 72(16), 1981 (1998); J. H. Ro "Poling Dynamics of Lithium Niobate Crystals for Nonlinear Optical Applications" Ph.D. thesis, Pusan National University (2001).  
 (23) V. Ya. Shur, E. L. Romyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, D. V. Fursov, R. G. Batchko, L. A. Eyres, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Appl. Phys. Lett. 76(2), 143 (2000).  
 (24) J. H. Ro and M. Cha, Appl. Phys. Lett. 77(15), 2391 (2000).  
 (25) Y. Furukawa, M. Sato, F. Nitanda, K. Ito, J. Crystal Growth 99 832 (1989); H. Ishizuki, and T. Taira, Opt. Lett. 30, 21 (2005).  
 (26) <http://www.opt-swing.com>

(27) C. Canalias and V. Pasiskevicius, Nat. Photonics 1 (2007).  
 (28) X. P. Hu, G. Zhao, Z. Yan, X. Wang, Z. D. Gao, H. Liu, J. L. He, and S. N. Zhu, Opt. Lett. 33, 4 (2008).  
 (29) M. Charbonneau-Lefort, M. M. Fejer, and B. Afeyan, Opt. Lett. 30, 6 (2005).  
 (30) M. Cha, Opt. Lett. 23, 4 (1998).  
 (31) O. Y. Jeon, M. J. Jin, H. H. Lim, B. J. Kim, and M. Cha, Opt. Express 14, 7210 (2006).  
 (32) O. A. Gilko, I. I. Naumova, H. K. Kim, J. J. Ju, M. Cha, and H. K. Kim, J. Korean Phys. Soc. 32, S464-S467 (1998).  
 (33) J. H. Kim and C. S. Yoon, Appl. Phys. Lett. 81(18), 3332 (2002).  
 (34) C. S. Yoon, S. Lee, M. H. Rim, Y. Yang, A. R. Lim, Y. C. Cho, S. Y. Jeong, Conference on Lasers and Electro-Optics, CF17 (2004).  
 (35) N. E. Yu, Y. Lee, Y. L. Lee, C. Jung, D.-K. Ko, and J. Lee, J. Opt. Soc. Korea, 11(4), 192-195 (2007).  
 (36) N. E. Yu, C. Kang, H. K. Yoo, C. Jung, Y. L. Lee, C.-S. Kee, D.-K. Ko, J. Lee, K. Kitamura, and S. Takekawa, Appl. Phys. Lett. 93(4), 041104-1 (2008).

약 령



차명식

• 근무처 :  
부산대학교 물리학과 (교수)

• 최종학력 :  
미국 University of Central Florida (박사)

• 주요경력 :  
(주)SKC 선임연구원  
IPOS, UC Santa Barbara 박사후 연구원  
일본 분자과학연구소 방문교수  
Optical Science Ctr. U. Arizona 방문교수

• e-mail : mcha@pnu.edu

약 령



유난이

• 근무처 :  
광주과학기술원 고등광기술연구소 (선임연구원)

• 최종학력 :  
부산대학교 물리학과 (박사)

• 주요경력 :  
일본물질과학연구소 (NIMS) 박사후 연구원

• e-mail : neyu@gist.ac.kr