

1. 서론

1990년대 초반 개발된 주기적 분극 반전 기술의⁽¹⁾ 발전은 비선형 광학 연구의 새로운 전기를 마련하였다. 실용에서의 재현성있는 주기적 분극 반전 기술 개발은 1962년 암스트롱(Armstrong)⁽²⁾ 등에 의해 제안된 준위상 정합(QPM: quasi-phase matching) 기술을 실현 가능하게 하였고, 특히 높은 비선형 계수에도 불구하고 분산(dispersion)의 문제로 인해 사용되지 못하고 있던 LiNbO₃의 비선형 계수 성분 d_{33} 의 이용을 가능케 하여, LiNbO₃를 가장 많이 생산, 소비되는 비선형 광학 물질의 위치에 오르게 하였다.

최근에는 LiNbO₃를 이용한 비선형 광학 집적소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. LiNbO₃ 집적소자는

이터의 전송 속도나 형태에 독립적인 변환 효율, 낮은 cross talk와 광통신 파장대역에서 높은 투과도 등, 광섬유 통신에서 요구되는 많은 조건들을 충족시킬 수 있는 장점들을 가지고 있다. Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 신호 처리 분야는 자기위상 변조와 펄스 압축^(5,6)(self phase modulation and pulse compression), 광 샘플링⁽⁷⁾(optical sampling), 광매개 증폭(optical parametric amplification), 광 코드분할 다중화 접속⁽⁸⁾(OCDMA), 파장변환⁽⁹⁾(wavelength conversion), 광 게이트 스위치⁽¹⁰⁻¹²⁾(optical gate switch), 양자정보처리 등에 걸쳐 매우 다양하다.

본 글에서는 파장분할다중(WDM: Wavelength Division Multiplexing)/시간분할다중(TDM: Time Division Multiplexing) 초고속 광 네트워크 구성에 필수

특집 ┃ 비선형광학

Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 신호처리

이영락*

도파로, 미세전극 등의 집적을 이용하여 소자의 크기를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 벌크(bulk) 비선형 소자에 비해 월등히 높은 비선형 효율을 가진다. 이러한 고효율 비선형 광학 집적 소자의 개발은 효율적인 광도파로 제작 기술에 의해 가능하였다. LiNbO₃에 사용되는 광도파 기술은 크게 APE(annealed proton exchange) 도파로와 티타늄(Ti: titanium) 확산 도파로가 있으며, 이중 Ti 확산 도파로는 TE와 TM 파를 동시에 도파할 수 있는 특성으로 인하여 비선형 광학 뿐만 아니라, 전기광학을 이용하는 여러 소자에 널리 이용되고 있다.

주기적으로 분극 반전된 Ti:LiNbO₃(Ti:PPLN: titanium-indiffused periodically poled LiNbO₃) 도파로 소자는 다른 종류의 전광 신호 처리 소자들^(3,4)에 비해 데

적인 전광 파장변환 기술을 Ti:PPLN 도파로 소자를 이용하여 시험한 결과들에 관하여 소개하고자 한다.

2. Ti:PPLN 도파로 소자 제작

일반적인 Ti:PPLN 도파로 소자 제작은 다음과 같이 설명할 수 있다(그림 1)⁽¹³⁾. 0.5mm 두께, 4" 직경을 가진 Z-cut LiNbO₃ 웨이퍼의 -c 면에 X-축을 따라 폭 7 μ m의 Ti-stripe를 사진식각기술(photolithography)을 이용하여 만든 다음, 8.5 시간동안 1060°C에서 확산시켜 채널형 도파로를 제작한다. Ti 확산 중 발생하는 +c 면의 얇은 도메인 반전 층을 제거한 후에, LiNbO₃의 분극 방향

* 고등광기술연구소

Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 신호처리

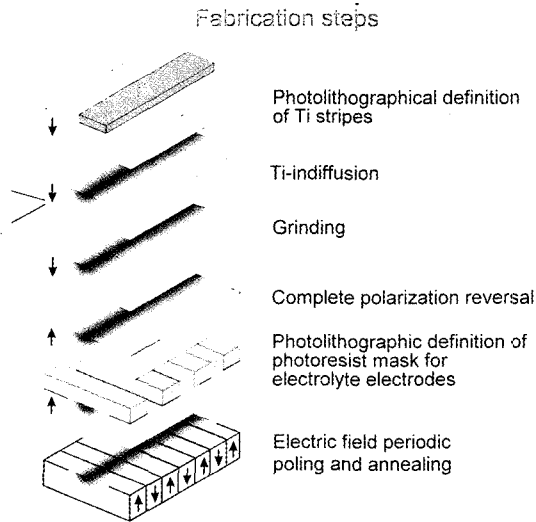


그림 1. Ti:PPLN 제작 공정

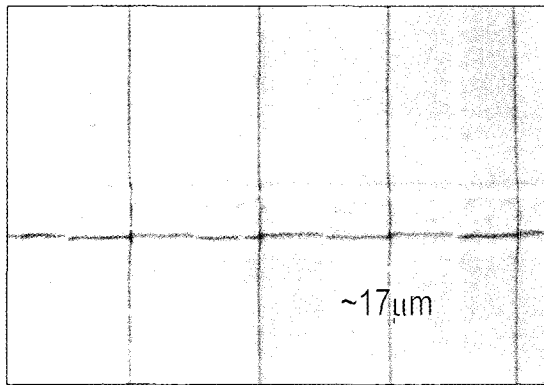
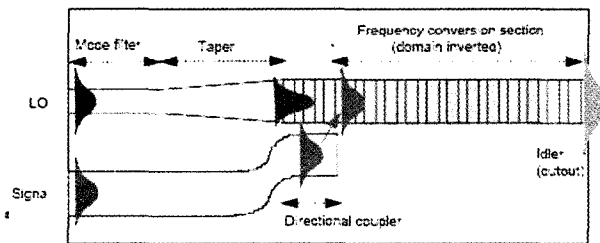
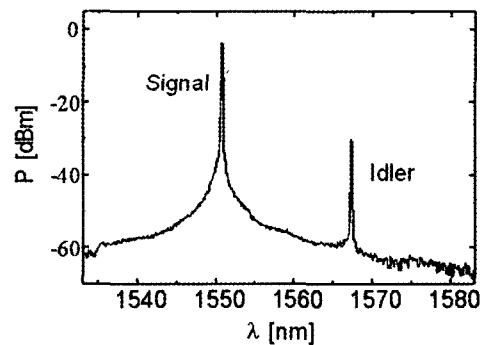


그림 2. 선택적 식각 후의 Ti:PPLN

을 반전시켜 Ti 도파로를 +c 면에 위치시킨 다음, 주기적인 포토리지스트(photoresist) 패턴과 액체 진공 기술



(a) 파장변환기 구조



(b) DFG에 의한 파장변환 스펙트럼

그림 3. 방향성 결합기가 집적된 파장변환기

(liquid electrode technique)을 이용하여 주기적 분극을 만든다. 일반적으로 분극 반전에 필요한 전압과 자발 분극은 각각 21kV/mm와 78µC/cm² 정도이다. 최종적으로 전기적 분극 유도 도중 발생한 스트레스를 열처리 (annealing)를 통하여 제거한다. 최근 발전된 분극 반전 기술은 Ti:PPLN 도파로 소자의 2차 조화파 효율을 수 천%/W 까지 끌어 올렸다. Ti 도파로는 일반적으로 4 × 5µm²의 단면적을 가지며, 광섬유를 이용하여 커플링 시킬 경우 -5dB 이하의 손실을 가진다. 이때 도파로 진행 손실은 TM 편광의 경우, -0.1dB/cm 이하이다. 그림 2는 제작된 Ti:PPLN 도파로 소자를 식각 용액(HF : HNO₃=1:2)을 이용하여 선택 식각한 후 광학 현미경을 통해 관찰한 사진이다. 가로줄은 Ti 도파로이고, 세로줄은 분극 반전된 QPM 격자이다.

3. 전광 파장변환 방법

파장변환 장치는 정보 소통량 관리에 유연성을 부여함과 동시에 광 네트워크의 동적 재구성성을 용이하게 한다. Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 파장변환 기술은 크게 차주파수 발생(DFG : difference frequency generation), 캐스케이드 차주파수 발생(cDFG: cascaded difference frequency generation), 캐스케이드 합주파수/차주파수 발생(cSFG/DFG: cascaded sum & difference frequency generation)으로 나눌 수 있다.

DFG 발생을 이용한 파장변환의 경우, 신호(signal)가 700-800 nm 대역의 펄스 광에 의해 아이들러(idler)로 변환된다. 이 경우, signal을 단일모드로 도파하게 만든

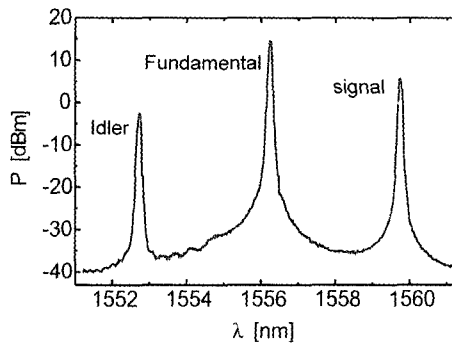
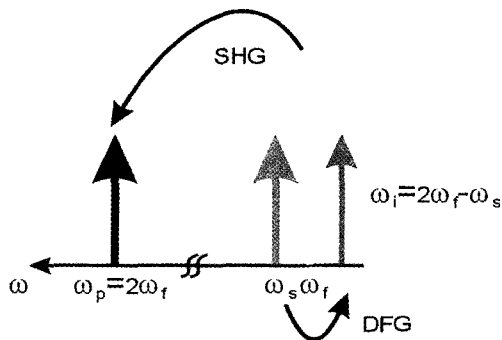


그림 4. (a) cDFG를 이용한 파장변환의 원리, (b) cDFG에 의한 파장변환 스펙트럼.

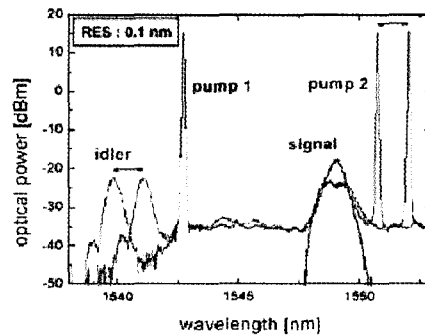
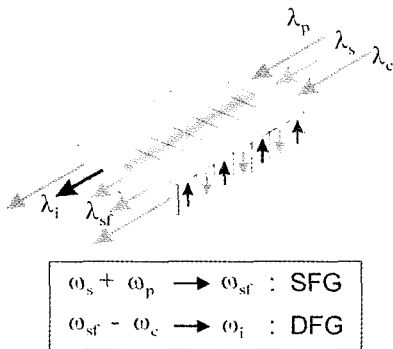


그림 5. (a) cSFG/DFG의 개요도, (b) pump2의 파장 변화에 따른 idler의 파장 변화

도파로에서 펌프 광이 다중모드를 가지게 되므로, 도파로 내부에서 모드 중첩이 감소하여 변환 효율을 떨어뜨리는 단점이 생기게 된다. 이를 보완하기 위해 방향성 결합기(directional coupler)방식의 PPLN 소자가 개발되었다⁹⁾. 그림 3과 같이 단일모드로 입사한 펌프광은 테이퍼(taper)된 영역을 통과하면서 모드 크기가 변화되며 주기 격자를 가진 영역으로 입사하게 된다. Signal의 경우는 아래쪽 도파로에 단일모드로 입사하여 방향성 결합기에서 위쪽 도파로로 결합되어 넘어 가게 되는 구조를 가진다. 이와 같은 집적화는 파장 변화효율의 증대를 가져 왔으나, 여전히 광통신 파장대역이 아닌 펌프 광(700~800nm)이 필요하다는 문제점을 가지고 있다. 그림 3(b)는 DFG 방식에 의한 파장변환 스펙트럼의 한 예를 보여주고 있다. DFG 방식에서는 최대 -4dB의 파장변환 효율이 보고되었는데, 이때 사용된 샘플의 길이는 42mm이고, 펌프 광의 세기는 약 90mW였다¹⁴⁾.

cDFG 방식은 캐스케이드 2차 조화파/차주파수 발생(cSHG/DFG : cascaded second harmonic generation/difference frequency generation)이라고도 불리며, 광통

신 영역의 펌프 광을 이용하여 파장변환에 성공함으로써 DFG 방식의 문제점들을 해결하였다. cDFG 방법을 이용한 파장변환은 그림 4로 설명할 수 있다. 기본파(fundamental wave) ω_f 가 파장변환기에 입사하여 ω_p 의 2차 조화파를 만들고, 이 만들어진 2차 조화파는 signal ω_s 와 DFG 과정을 거쳐 idler ω_i 를 재생한다. 마치 four wave mixing과 같은 3차 비선형 광학($\chi^{(3)}$) 과정을 두 번의 비선형 2차 비선형 광학($\chi^{(2)}$) 프로세스로 구현하기 때문에 캐스케이드(cascaded)라는 접두어가 붙는다¹⁵⁾. cDFG 파장변환에서는 2차 조화파 발생 대역폭이 일반적으로 매우 좁으나, DFG는 특성상 상당히 넓은 파장변환 대역폭을 가질 수 있다. 이로 인해 수 cm 길이의 Ti:PPLN 도파로를 이용할 경우 C-band 통신 대역 전체를 파장변환 대역폭으로 가질 수 있다. 그림 4(b)는 약 6cm의 샘플을 이용하여 측정된 파장변환 스펙트럼이다. 이때 파장변환 효율과 파장변환 대역폭은 각각 -8dB, 55nm로 보고되었다¹³⁾.

cDFG 방식에서는 기본파의 파장이 QPM 주기에 의해 결정되고, idler의 파장은 기본파와 signal의 파장에 의해

Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 신호처리

결정되어지므로, idler의 파장 선택성이 없어지게 된다. 이러한 cDFG 방식의 문제를 해결할 수 있는 대안으로 제안된 방식이 cSFG/DFG 방식이다⁽¹⁶⁾. cSFG/DFG 방식에서는 변환하고자 하는 signal과 첫 번째 펌프 광(pump1)을 이용하여 SFG 신호를 만들고, 발생한 SFG 신호와 두 번째 펌프 광(pump2)이 DFG를 통하여 signal을 다른 파장으로 변환시킬 수 있다. 이때 pump2의 파장을 변화시키면 생성되는 idler의 파장도 변화하게 된다(그림 5). 첫 번째 SFG 과정은 완벽한 위상 정합에 의한 것이고, 두 번째 DFG 과정(파장 가변시)에서는 약간의 위상 부정합이 존재하나 파장변환 효율에는 큰 차이가 없다. 그림 5(b)는 cSFG/DFG 방식을 이용한 파장변환 및 가변을 보여주는 스펙트럼이다. 그림에서 signal

과 파장변환된 idler의 선폭이 넓은 것은 실험에 사용된 signal 광원이 10GHz의 반복율(펄스폭: 5 ps)을 가지는 광섬유 모드 잠금 레이저이기 때문이다.

최근에는 이러한 단일 파장변환 소자뿐만 아니라, 동시에 여러 신호를 파장변환할 수 있는 다중 채널 파장변환⁽¹⁷⁾, 장거리 전송단에서의 분산 보상용 mid-span⁽¹⁸⁾, 선택적 파장변환⁽¹⁹⁾ 등의 다양한 기능을 가진 파장변환 소자들에 대한 연구결과들이 보고되고 있다. 다음 장에서는 여러 응용의 예들 중 Ti:PPLN 도파로에 온도 구배를 조절하여 파장변환할 채널의 수를 조절 하는 기술, QPM 격자의 주기를 조절하여 만든 Ti:PPLN 소자를 이용한 선택적 파장변환 기술, 그리고 실제 광통신 선로에서의 실험 결과에 대하여 간단히 소개하겠다.

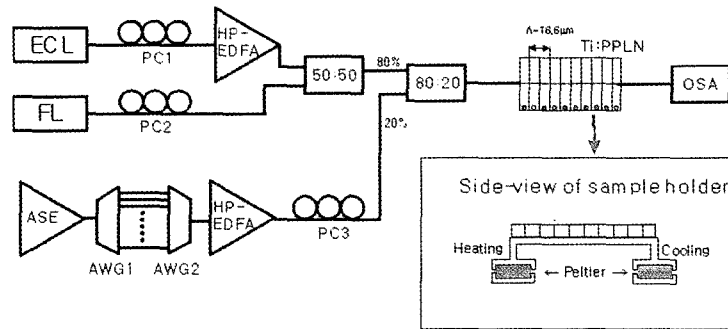


그림 6. 다중 채널 파장변환 실험 장치도. ECL : extended cavity laser, FL : tunable fiber laser, ASE : amplified spontaneous emission source, PC : polarization controller, HP-EDFA : high power erbium-doped fiber laser amplifier, AWG : arrayed waveguide grating, OSA : optical spectrum analyzer

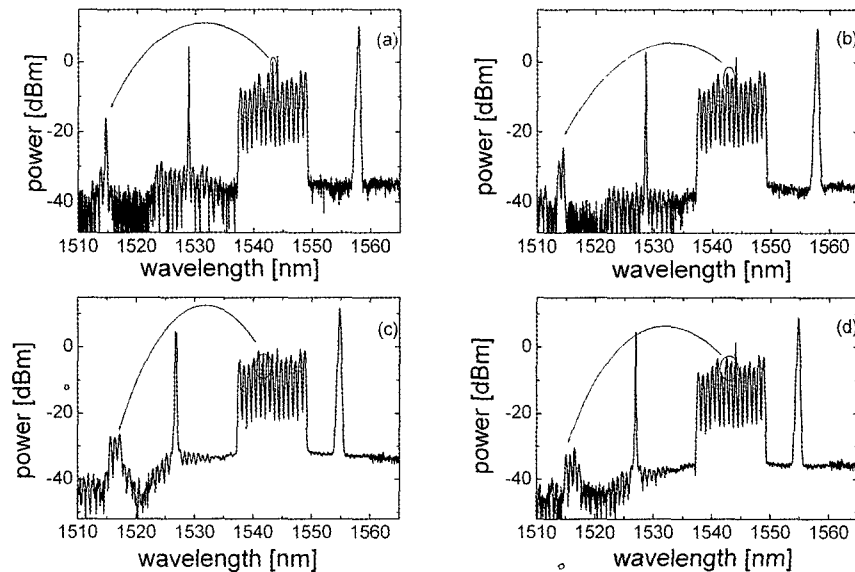


그림 7. 4가지의 다른 온도 구배에서의 cSFG/DFG 스펙트럼. (a) 0°C, (b) 7.5°C, (c) 12°C, (d) 16.8°C

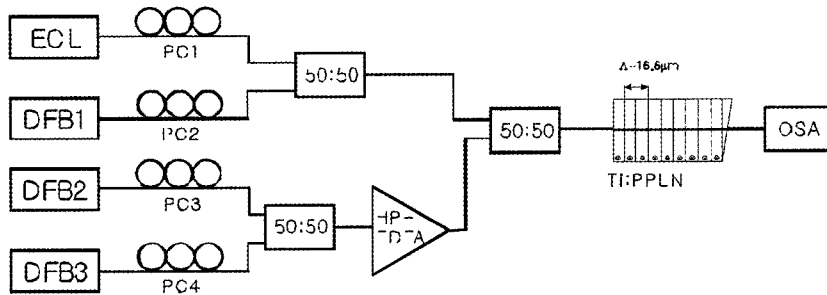


그림 8. 선택적 파장변환 실험 장치도. ECL: extended cavity laser, DFB: distributed feedback laser, HP-EDFA: high power erbium-doped fiber amplifier, OSA: optical spectrum analyzer

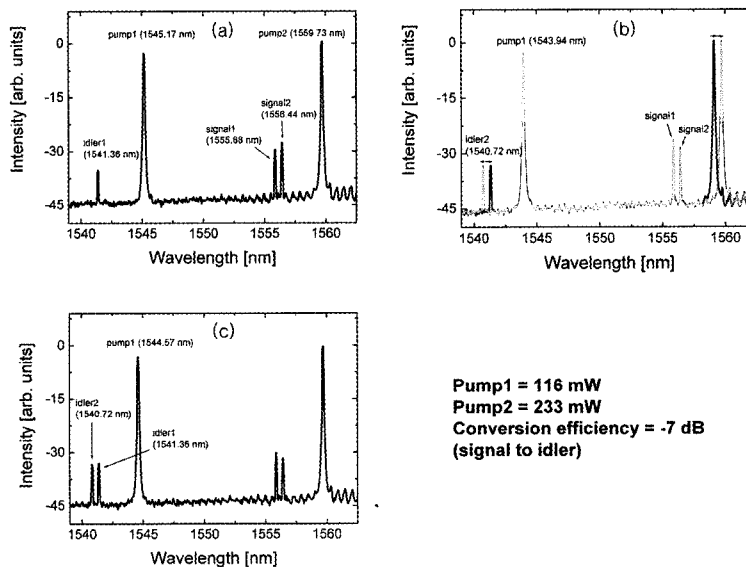


그림 9. 선택적 전광 파장변환 스펙트럼. (a) signal1의 전광 파장변환, (b) signal2의 전광 파장변환 및 파장 기반, (c) 두 채널 전광 파장변환

4. 기능성 전광 파장변환 기술 및 전송 실험

4.1 온도 구배를 이용한 전광 파장변환 기술

Ti:PPLN 도파로에 형성된 온도 구배는 준위상 정합 밴드 폭을 증가시킬 수 있고^[20], 이런 특성을 이용하면 동시에 파장변환할 수 있는 signal의 수를 변화시킬 수 있다. 그림 6은 온도 구배를 가지는 Ti:PPLN 도파로에서의 전광 파장변환 실험 장치도이다. 첫 번째 펌프 광(ECL)은 100GHz의 채널 간격을 가진 WDM signal과 SFG를 발생시키고, 생성된 SFG는 두 번째 펌프 광(FL)과 DFG 과정을 통해 idler를 만든다. Ti:PPLN의 온도 구배는 그림 6의 작은 그림 상에서 볼 수 있는 것과 같이 두 개의 Peltier 소자를 이용하여 한쪽에 열을 가하고,

반대쪽을 냉각시키는 구조를 이용하여 구현하였다. 실험 결과, 그림 7과 같이 온도 구배 정도에 따라 최고 4채널(온도구배: 16.8℃)까지 동시에 파장변환이 가능하였다^[21]. 이러한 온도 가변에 의한 파장변환 채널 수 조정은 Ti:PPLN 소자의 실제 광통신 시스템사용 가능성을 증가시킬 수 있다.

4.2 선택적 파장변환 기술

대부분의 전광 신호처리 소자는 규칙적인 주기적 분극 반전을 가진 Ti:PPLN 도파로 소자를 이용하나, 본 장에서 소개할 선택적 파장변환 기술은 두 개의 2차 조화파 봉우리(peak)를 갖는 한 개의 Ti:PPLN 도파로 소자를 이용하여 채널 선택적 파장변환이 가능한 기술이다^[19].

Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 신호처리

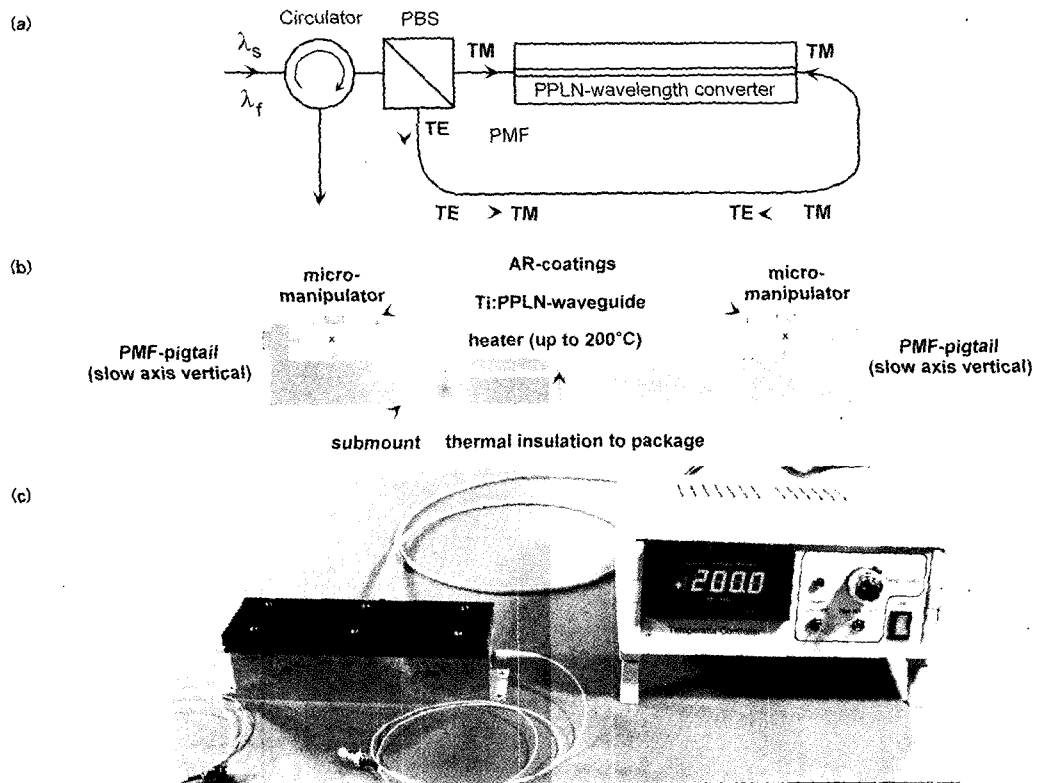


그림 10. European IST-project ATLAS에 이용된 Ti:PPLN 파장변환기. (a) 편광의존성이 없는 파장변환기 계략도, (b) 실험에 사용된 소자의 패키징 단면도, (c) 소자 온도 제어기와 패키징 된 Ti:PPLN 도파로 소자 (제작 Paderborn Univ.)

이러한 소자에서는 두 signal(1, 2)과 동시에 SFG 발생을 시킬 수 있는 펌프 파장이 존재하게 되어 선택적 파장 변환은 물론, 동시에 두 signal을 파장변환할 수 있는 특성이 있다.

실험에 사용된 샘플은 16.6 μm 주기로 주기적 분극 반전된 길이 80mm의 Ti:PPLN 도파로 소자였고, 샘플 온도는 광유도 굴절 손상(photorefractive damage)을 최소화하기 위해 157°C로 유지했다. 실험장치도는 그림 8과 같이 구성하였는데, ECL과 DFB1은 signal1과 signal2로 이용되었고, DFB2와 DFB3는 각각 SFG와 DFG를 위한 펌프 광으로 이용되었다. 실험 결과는 그림 9의 스펙트럼과 같다. 그림 9(a)는 signal1을 파장변환한 경우이고, 그림 9(b)는 signal2를 파장변환한 다음, 두 번째 펌프광의 파장을 변화시켜 파장 가변을 시험한 경우이다. 그림 9(c)는 동시에 두 signal을 파장변환한 경우의 스펙트럼이다. 이때 파장변환효율은 -7dB였고, 파장 가변 대역폭은 48nm였다.

4.3 전송 실험

Ti:PPLN 도파로를 이용한 파장변환기의 경우, 데이터의 속도와 형태에 독립적인 변환효율, 낮은 cross talk과 광통신 파장대역에서의 높은 투과도 등 광통신에서 요구되는 많은 조건들을 충족시킬 수 있으나, 편광에 의존하는 비선형 2차 효과를 이용하는 소자의 특성상 실제적인 광통신 실험에 이용되기 힘든 단점을 가지고 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위해 여러 가지 편광의존성이 없는 파장변환기가 제안되어 왔다⁽²²⁻²⁵⁾. 그 중 가장 실용적인 형태는 European IST-project ATLAS의 전송 실험(Field Test)에 사용되었던 그림 10과 같은 편광 독립적인 파장변환기(cDFG 방법)이다⁽²⁵⁾.

편광의존성이 없는 파장변환기의 동작 원리는 다음과 같다(그림 10(a)). 입사한 signal과 기본파는 circulator를 통과하여 편광 광 분할기(PBS)로 입사한다. 입사된 광의 TM 편광성분은 편광(PM) 파이버를 통과하여 Ti:PPLN 소자로 입사하게 되며, 이때 파장변환된 신호

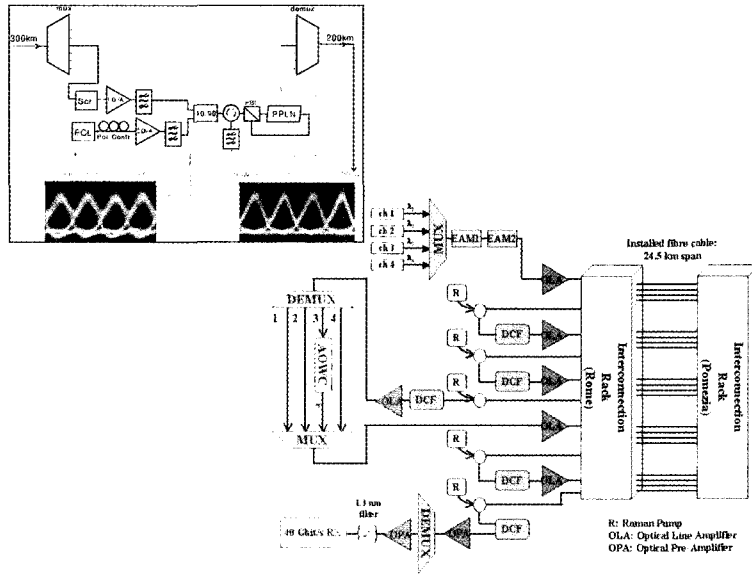


그림 11. ATLAS 프로젝트에 사용된 500km 전송단(real field) 개략도

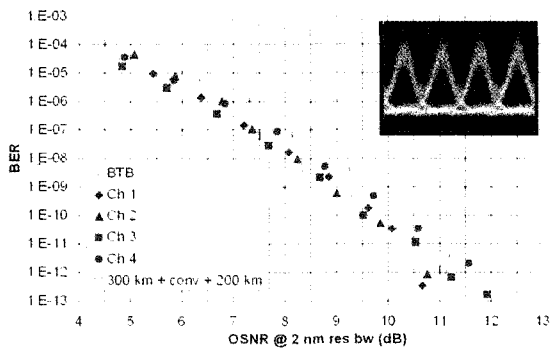
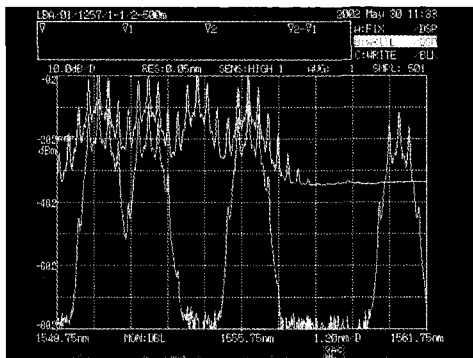


그림 12. (a) Ti:PPLN 파장변환기 전후의 광 스펙트럼 (3번 → 7번), (b) NZDS single-mode fiber (G.655)에서의 BER 측정 결과

(idler)는 TM 편광을 가진다. 발생한 idler는 직각으로 융착된 PM 파이버를 통과하면서 편광방향이 TE로 변화하게 된다. 이렇게 TE 편광을 가지게 된 idler는 PBS를 통과한 후 circulator의 출력단으로 나오게 된다. PBS로 입사한 signal과 기본파의 TE 편광성분은 PBS에서 100% 반사하여 직각으로 융착된 PM 파이버를 통한 후, TM 성분만을 가지고 Ti:PPLN 소자의 뒷단으로 입사된다. 이때 생성된 idler는 PBS를 통과하여 circulator 출력단에서 반대방향으로 진행한 idler와 만나게 된다. 이러한 편광 의존성이 없는 파장변환기의 개발은 광섬유를 통해 전달되어 오면서 끊임없이 변화하는 신호의 편광에 무관하게 파장변환을 할 수 있는 길을 열어, Ti:PPLN 도 파로 소자의 실용성을 증대시켰다.

그림 10에 보이는 편광에 독립적인 파장변환기는 총 연장 500km의 4×40Gbit/s WDM 전송단에서 성공적인 전광 파장변환과 재전송의 결과를 보여주었다^[25]. 4채널의 40Gbit/s의 WDM 신호를 300km 전송시킨 후, 그 중 한 채널(1554.1nm)의 신호를 Ti:PPLN 파장변환기를 이용하여 1560.6nm로 파장변환시켜, 다시 200km 전송시켰다. 사용된 파이버는 G.655와 G.652였고, 두 경우 모두에서 error free(BER < 10⁻¹³)와 낮은 penalty (< 0.5dB)를 확인하였다. 그림 11과 그림 12는 실험에 사용된 500km의 WDM 전송단 개략도와 실험 결과이다. 그림 11의 작은 그림 상자는 역다중화기(DEMUX)와 다중화기(MUX) 사이에 설치된 전광파장변환기(AOWC)부분을 확대한 것이다. 그림 12(a)는 DEMUX 전과 MUX

Ti:PPLN 도파로 소자를 이용한 전광 신호처리

후의 스펙트럼을 보여주는 실험결과로서, Ti:PPLN 도파로의 효과적인 파장변환을 보여준다.

5. 결론

지난 10년간 눈부신 발전을 이룬 주기적 분극 반전 기술에 힘입어 많은 종류의 준위상 정합 소자들이 개발되었다. 이 글에서는 대표적인 준위상 정합 소자인 Ti:PPLN 도파로를 이용한 전광 신호 처리 분야, 특히 차세대 초고속 광통신에서 필수적인 전광 파장변환기에 관하여 간략하게 소개하였다. 준위상 정합 소자는 기존의 전자 소자로는 실행 불가능한 빠른 반응 속도를 요구하는 여러 과학 분야는 물론, 서론에서 언급한 여러 비선형 전광 신호처리에 필수 불가결한 소자로 자리잡고 있다. 뿐만 아니라, 환경, 군사, display 및 의료용 광원 제작에 이미 사용되고 있으며, THz 광원과 같은 차세대 광원 개발에도 이용될 수 있는 기본 소자로서 선진 각국에서는 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나, 국내에서는 아직 준위상 정합 소자 개발에 관한 연구기반이 매우 취약한 상태이므로, 이 분야에 대한 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

Reference

(1) M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh, K. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 435 (1993).
 (2) I. A. Armstrong, N. Bloembergen, I. Ducuing, P. S. Pershan, *Phys. Rev.*, **127**, 1918(1962).
 (3) K. Inoue, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 1451(1994).
 (4) F. Ratovelomanana, N. Vodjdani, A. Enard, G. Glastre, D. Rondi, R. Blondeau, C. Joergensen, T. Durhuus, B. Mikkelsen, K. E. Stubkjaer, A. Jourdan, G. Soulage, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 992(1994).
 (5) M. Sundheimer, C. Bosshard, E. Vab Stryland, G. Stegeman, J. Bierlein, *Opt. Lett.*, **18**, 1397(1993).
 (6) M. A. Arbore, A. Galvanauskas, D. Harter, M. H. Chou, M. M. Fejer, *Opt. Lett.*, **22**, 1341(1997).
 (7) T. Suhara, H. Ishizuki, M. Fujimura, H. Nishihara, *IEEE, Photon. Technol. Lett.*, **37**, 842(2001).

(8) D. Gurkan, S. Kumar, A. Sahin, A. Willner, K. Parameswaran, M. Fejer, D. Starodubov, J. Bannister, P. Kamath, J. Touch, *FD6, OFC2003*(2003).
 (9) M. H. Chou, J. Hauden, M. A. Arbore, M. M. Fejer, *Opt. Lett.*, **23**, 1004 (1998).
 (10) R. Schiek, M. L. Sundheimer, D. Y. Kim, Y. Beak, G. I. Stegeman, H. Seibert, W. Sohler, *Opt. Lett.*, **19**, 1949(1994).
 (11) Y. L. Lee, H. Suche, Y. H. Min, J. H. Lee, W. Grundkoetter, V. Quiring, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 978(2003).
 (12) Y. L. Lee, C. Jung, Y. -C. Noh, I. W. Choi, D.-K. Ko, J. Lee, H. Y. Lee, H. Suche, *Opt. Express* **12**, 701(2004).
 (13) G. Schreiber, H. Suche, Y. L. Lee, W. Grundkoetter, V. Quiring, R. Ricken, W. Sohler, *Appl. Phys. B*, **73**, 501(2001).
 (14) H. M. Chou, K. R. Parameswaran, M.M. Fejer, *Opt. Lett.*, **24** 1157(1999).
 (15) K. Gallo, G. Assanto, G. I. Stegeman, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1020(1997).
 (16) Y. H. Min, J. H. Lee, Y. L. Lee, W. Grundkoetter, V. Quiring, W. Sohler, *OFC '03*, 767(2003).
 (17) M. H. Chou, I. Brener, M. M. Fejer, E. E. Chaban, S. B. Christman, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 653(1999).
 (18) M. H. Chou, I. Brener, G. Lenz, R. Scotti, E. E. Chaban, J. Shmulovich, D. Philen, S. Koshinski, K. R. Parameswaran M. M. Fejer, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 82(2000).
 (19) Y. L. Lee, C. Jung, Y.-C. Noh, M. Y. Park, C. C. Byeon, D. -K. Ko, J. Lee, *Opt. Express* **12**, 2649(2005).
 (20) Y. L. Lee, Y. -C. Noh, C. Jung, T. J. Yu, D. -K. Ko, J. Lee, *Opt. Express* **11**, 2813(2003).
 (21) Y. L. Lee, B. -A. Yu, C. Jung, Y.-C. Noh, J. Lee, D. -K. Ko, *Opt. Express* **13**, 2988(2005).
 (22) C. Q. Xu, H. Okayama, T. Kamijoh, *Opt. Rev.*, **4** 546(1997).
 (23) I. Brener, M. H. Chou, E. Chaban, K. R. Parameswaran, M. M. Fejer, S. Kosinski, D. L. Pruitt, *Electron. Lett.*, **36**, 66(2000).
 (24) T. Suhara, *Annu. Meet. IEEE Lasers Electro-Optics Soc.*, TuCC3, 364 (2001).
 (25) A. Schiffrin, A. Paoletti, D. Caccioli, P. Minzioni, P. Griggio, G. Lorenzetto, S. Cascelli, M. Guglielmucci, F. Matera, G. Tosi-Beleffi, H. Suche, Y. L. Lee, V. Quiring, W. Sohler, *OFC '03*, TuS5(2003).

약 력



이명락

2002년-현재 : 고등광기술연구소 선임연구원
 2000년-2002년 : 독일 Paderborn 대학교(Integrated Optics Group) 연구원
 2000년 : 영남대학교 물리학과, 이학박사
 1996년 : 영남대학교 물리학과, 이학석사
 1994년 : 영남대학교 물리학과, 이학사