

Thema | 비선형 광섬유와 그 응용

1. 서론

김 윤현 선임연구원
(LG전선 통신연구소)

오 경환 교수
(광주과학기술원 정보통신공학과)

1970년대부터 시작된 레이저와 광섬유를 이용한 광통신은 광학 기술에 기초하여 많은 발전을 하였다. 특히, 최근에는 Fiber-to-the-home(FITTH)이라고 해서 집안까지 빛을 직접 들여보내는 연구들이 한창 진행 중이다. 이는 인류가 현재까지 발견한 통신 전달 매체 중에서 빛이 가장 넓은 대역폭을 가지고 가장 빠르게 전달할 수 있기 때문이며, 광통신 기술에 있어서는 궁극적인 목표라고 할 수 있다.

이와 같은 광통신 기술의 발전에 있어서 초창기부터 꾸준히 관심을 갖고 연구 되고 있는 분야들 중에 대표적인 것이 광섬유의 비선형 광학 특성이다. 비선형 광학 특성이란 빛의 세기에 따라 빛이 지나는 매질의 광학적 특성이 변하는 것을 말한다. 광섬유에 있어서 비선형 광학 특성은 광통신의 응용 영역에 따라서 상반된 연구가 진행되고 있다. 최근 대용량 정보 전달의 효율을 높이는 방법으로 활용되고 있는 여러 파장에 독립적인 정보를 실어 보내는 파장분할다중(Wavelength division multiplexing, WDM)방식을 이용한 장거리 전송망에서는 광섬유에서의 Four wave mixing이라는 비선형 광학 현상이 문제가 되어 이를 줄이고자 한다. Four wave mixing이란 이웃한 네 개의 다른 파장의 광원들이 위상 조건을 만족하면서 서로 상호 작용을 일으켜 각 파장별로 독립적인 신호를 보내지 못하게 되는 현상이다. 반면에, 광통신에 있어서 광신호 처리에 필요한 여러 기능을 수행할 수 있는 능동형 광소자를 구현하려는 분야에 있어서는 광섬유의 비선형성을 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 일례로 광신호의 파장을 중간에 바꾸어 줄 수 있는 파장 변환기[1]나 광신호의 경로를 바꾸어 주는 광스위칭 소자[2] 등이 있다.

본 글에서는 비선형성이 높은 광섬유(이른바 비선형 광섬유)를 중심으로 광섬유에서의 비선형 광학 특성과 비선형 광섬유의 종류 및 제작 방법, 그리고 비선형 광섬유의 평가방법과 활용 예들을 간략하게 소개하고자 한다.

2. 광섬유에서의 비선형 광학 특성

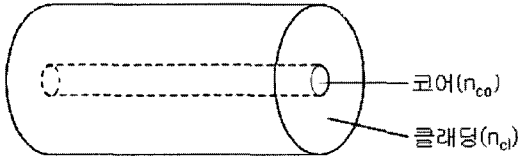


그림 1. 광섬유의 기하 구조.

광섬유는 그림 1과 같이 10 μ m미만의 직경을 갖는 코어와 주위에 125 μ m의 직경을 갖는 클래딩으로 이루어졌으며, 빛은 코어의 굴절률(n_{co})이 클래딩의 굴절률(n_{cl})보다 높음으로 인해 생기는 전반사 원리에 따라서 코어로 진행하게 된다. 따라서 광섬유의 비선형성은 광섬유 코어 매질의 비선형 광학 특성에 의해 결정된다.

광섬유의 비선형성으로 Four wave mixing외에 Raman scattering의 현상에 의해 한 파장의 레이저 광원에 의해 여러 파장의 광원을 생성시키는 것 등이 있지만, 가장 대표적인 예는 식 (1)과 같이 빛의 세기에 따라 매질의 굴절률이 달라지는 것이다.

$$n = n_0 + n_2 \cdot I \quad (1)$$

여기서, n 은 빛이 느끼는 매질의 굴절률이고 n_0 는 비선형성이 나타나지 않을 때 빛이 느끼는 매질의 굴절률이다. n_2 는 매질의 비선형 굴절 계수이고 I 는 빛의 강도이다. 식 (1)에 의하면 광섬유 코어의 굴절률 변화는 매질의 비선형 광학 계수뿐만 아니라 빛의 강도에 의해 결정됨을 알 수 있다. 만일 1mW의 레이저 광원이 직경이 10 μ m인 코어 영역을 통해 지나가면, 광섬유 코어에서 빛의 강도는 약 1mm² 영역에 12.7W의 빛이 지나가는 것과 동일한 빛의 강도를 보인다. 따라서 광섬유 코어 매질의 비선형 굴절 계수가 작더라도 Bulk 재료에서보다 상대적으로 큰 비선형성을 얻을 수 있다. 또한, 광섬유는 길이를 길게 하는 것이 용이하기 때문에 비선형성을 관찰하기 쉽다는 장점이 있다.

비록 광섬유 코어의 면적을 줄임으로써 큰 비선

형성을 얻을 수 있지만, 너무 코어의 직경이 작아지면 빛을 광섬유 코어로 입사하는 효율이 크게 낮아지기 때문에 한계가 있다. 또한, 광섬유의 비선형성을 이용한 광소자의 구현에 있어서는 광섬유의 길이가 짧아야 하기 때문에, 광섬유의 비선형성을 향상시키기 위해서는 광섬유 코어 매질의 비선형 광학 계수를 크게 하는 것이 근본적으로 요구된다. 참고로, 현재까지 많이 연구된 비선형 광섬유들은 주로 실리카 유리에 비선형성이 큰 물질을 첨가하는 방법들이 연구 되었는데, 이는 실리카 유리가 비록 n_2 값이 약 $2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ 로 매우 작지만 광손실과 기계적인 특성 면에서 기존의 광섬유와 동일한 특성을 갖기 때문이다.

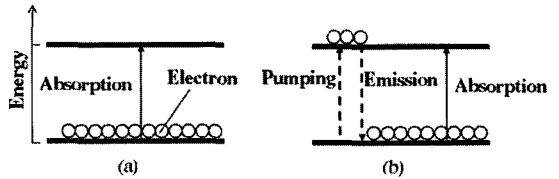


그림 2. 공진형 비선형성을 갖는 재료들의 펄핑 전후의 전자 분포 상태 : (a) 펄핑 전, (b) 펄핑 후.

한편, 광섬유의 비선형성은 발생 원인에 따라 크게 공진형 비선형성과 비공진형 비선형성으로 나눌 수 있다. 공진형 비선형성은 광섬유 코어의 기저 재료 또는 비선형 물질의 첨가에 의해 생기는 광흡수 영역과 강한 빛(펌프 광원)의 파장이 일치하여 발생하는 비선형성이다. 펄프 광원이 그림 2와 같이 바닥 상태에 있는 전자들을 해당 에너지 준위로 여기시킴으로 인해서 코어 재료의 광흡수 특성을 바꿔게 하는데, 이는 Kramers-Kronig 관계에 의하면 굴절률 변화를 유도한다[2]. 이런 종류의 비선형성은 펄프 광원의 파장 근처에서는 매우 큰 값을 갖고 멀리 떨어진 파장에서는 점점 작아지는 특성을 갖지만 기본적으로 큰 비선형 굴절 계수를 갖는다. 기존 결과에 의하면, 실리카 광섬유에 비해 100,000 배 이상 큰 비선형 굴절 계수를 갖는 경우도 보고되었다. 그러나 만일 펄프 광원이 없다면 여기 되었던 전자들이 바닥상태로 돌아가게 되어 굴절률이 펄핑 전의 값을 갖게 된다. 이 때 원상태로 되돌아오는 시간은 전자

가 여기된 에너지 준위의 특성에 따라 수십ps에서 수십ms까지 갖는다. 공진형 비선형성을 이용하는 경우에는 주로 희토류 이온이나 전이 금속 또는 반도체 물질을 첨가하는데, 반도체 물질을 제외한 대부분의 물질은 1μs 이상의 느린 응답 시간을 갖는 것으로 알려졌다.

다음으로 비공진형 비선형성은 펌프 광원의 파장이 광섬유의 기저 재료나 비선형 물질의 광흡수 영역과 일치하지 않을 때 발생하는 비선형성이다. 이는 공진형 비선형성과 달리 강한 빛에 의하여 광섬유 코어 재료를 구성한 원자들의 편광율(Polarizability)을 외각 전자들의 궤도 분포 변화를 통해 강제적으로 변형시켜 재료의 광흡수 및 굴절률 변화를 유도하는 것으로 알려졌다[3]. 비록 원자 번호가 큰 중금속 원소들은 최외각 전자들이 원자핵으로부터 멀리 떨어져 있어 비교적 쉽게 펌프 광원에 의한 변형이 일어나 큰 비선형성을 갖지만, 비공진형 비선형성에 의한 비선형 굴절 계수는 $10^{12} \text{m}^2/\text{W}$ 보다 클 수 없는 것으로 알려졌다. 따라서 이런 종류의 비선형성은 공진형 비선형성 보다는 매우 센 펌프 광원이 필요하다. 그러나 펌프 광원이 제거되었을 때 원상태로 되돌아가는데 걸리는 시간이 1ps보다 짧아서, 매우 빠른 응답 시간을 요구하는 응용에 매우 유용하다. 현재 상용화되고 실리카 유리의 단일모드 광섬유에서 발생할 수 있는 비선형성이 이에 해당한다.

3. 비선형 광섬유의 제작 방법

현재까지 제작된 비선형 광섬유들은 광섬유 코어 내에 GeO_2 의 첨가 농도를 크게 증가시키거나 희토류 이온이나 전이 금속 또는 중금속 이온을 첨가하는 것으로 알려졌다[2, 4]. GeO_2 이외에 희토류 이온이나 금속 이온들을 광섬유 코어 내에 첨가하는 방법으로 몇 가지 형태들이 있는데 대표적인 방법으로는 개선된 화학기상증착법(MCVD)에서의 용액첨가법[5]과 에어로졸법[6]이 있다.

용액첨가법은 그림 3과 같이 MCVD 공정을 이용하여 실리카 유리관 내벽에 광섬유 코어에 해당하는 부분소결된 공극이 많은 유리층을 쌓은 후, 코어층

을 도핑 이온들이 용해된 용액으로 서서히 채워 코어층으로 용액침투가 충분히 이루어지도록 약 한 시간 정도 유지시킨다. 다음 남은 용액을 빼낸 후, 도핑된 코어층이 있는 광섬유 모재 유리관을 MCVD공정을 이용하여 염소와 헬륨 그리고 산소의 혼합가스를 흘려주면서 건조시킨다. 이후 계속하여 고온에서 소결과 함몰과정을 거쳐 광섬유 모재를 제작하고 광섬유 인출기를 이용하여 비선형 광섬유를 얻게 된다.

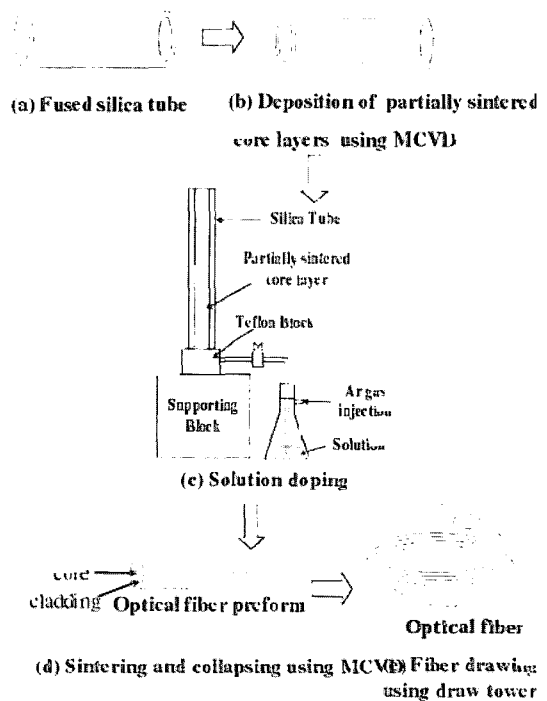


그림 3. MCVD 공정에서 용액첨가법을 이용한 비선형 광섬유 제조과정.

에어로졸법은 도핑 이온의 용액을 에어로졸의 형태로 운반 가스를 통해 코어층에 공급하여 코어층 증착시 같이 첨가하는 방법이다. 일반적으로 용액첨가법 보다는 에어로졸법이 광섬유 코어 내에 도핑 이온의 농도를 높이는 데 적합한 것으로 알려졌다. 그러나 에어로졸법은 도핑 용액이 기본적으로 에어로졸상태로 구현 가능해야 하는 반면에 용액첨가법은 용액 상태의 도핑 이온이면 이용 가능하기 때문에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 광섬유의 비선

형성은 비선형 재료의 도핑 농도에 따라 증가하기 때문에, 최근에는 용액첨가법을 변형하여 용액첨가법의 단점인 도핑 농도의 한계를 개선하려는 연구도 보고되고 있다[7, 8].

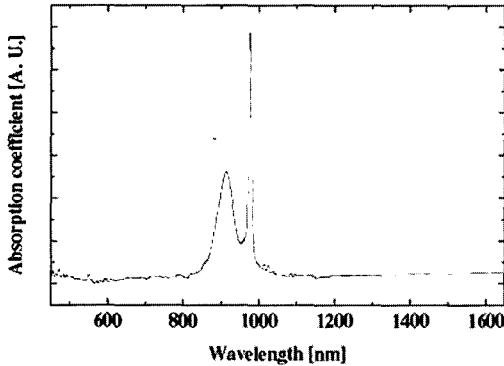


그림 4. Yb³⁺ 이온이 첨가된 비선형 광섬유의 450~1650nm영역에서의 광흡수 스펙트럼.

한편, 위와 같은 실리카 유리 광섬유 코어에 희토류 이온이나 금속 이온들을 첨가시키면 도핑 이온들의 광흡수 특성에 따라 광통신 대역(1310-1600nm)에서 큰 광손실을 유도할 수 있다. 하지만, 비선형성을 이용한 광소자로의 활용을 위해서는 비선형 광섬유 코어 내에 도핑된 비선형 재료가 광통신 대역에서 높은 광손실을 갖지 않도록 하여야 한다. 광통신 대역에서 낮은 광손실과 높은 비선형성을 갖는 것으로 보고된 대표적인 비선형 광섬유로는 GeO₂의 도핑 농도를 증가시킨 광섬유와 Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유가 있다[4,9]. Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유는 공진형 비선형성을 갖는 대표적인 광섬유이다. 그림 4는 Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유의 전형적인 광흡수 스펙트럼을 보여준다. 이에 의하면, 980nm 근방에서는 강한 흡수 특성을 보이지만 광통신 대역에서는 흡수 영역이 없음을 알 수 있다. 만일 980nm-LD가 펌프 광원으로 Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유 코어에 입사되면, 펌프 광원은 코어에 첨가된 Yb³⁺ 이온들에 의해 강하게 흡수되면서 앞서 언급한 Kramers-Kronig 관계에 따라 광통신 대역에서 큰 비선형성을 보이게 된다. 그 밖에 반도체 물질인 PbTe의 양자점을 광섬유 내에 도핑하거나 Tm²⁺이온을 첨가한 비선형 광섬

유의 연구들도 진행되고 있다[8,10].

4. 비선형 광섬유의 비선형 광학 특성 측정법

비선형 광섬유의 연구에 있어서, 광섬유의 비선형성을 키우는 것과 더불어 광섬유의 비선형성을 측정하는 것은 매우 중요하다. 비록 Bulk 재료들에 대한 많은 측정 방법이 개발되었지만, 광섬유의 경우에는 상대적으로 제약 조건이 많아서 비선형성을 측정할 수 있는 방법들이 그리 많지 않다. 현재까지 개발된 방법들로는 펄스 퍼짐(Pulse broadening) 현상을 이용하는 방법[11]과 펌프-프로브(Pump-probe) 방법[12]이 있으며, 빛의 간섭 현상을 이용한 방법들이 개발되었다.

펄스 퍼짐 현상을 이용한 방법은 아주 좁은 주파수 폭을 가진 펄스 광원이 비선형 광섬유를 지나게 되면 펄스의 폭이 광섬유의 비선형성에 의해 변하는 특성을 이용한 방법이다. 일반적으로 펄스의 폭이 광섬유의 비선형성에 의하여 퍼지기 때문에 펄스 퍼짐이라 불리며 펄스의 퍼짐 정도를 가지고 광섬유의 비선형성을 측정할 수 있다. 펌프-프로브 방법은 넓은 주파수 대역을 스캔할 수 있는 레이저를 광원으로 하여 펌프 빔과 프로브 빔으로 나눈 후, 프로브 빔을 이용해 펌프 광원의 출력 파워에 따른 넓은 주파수 대역에서의 광흡수 변화를 통해서 Kramers-Kronig 관계를 이용하여 광섬유의 비선형성을 측정하는 방법이다.

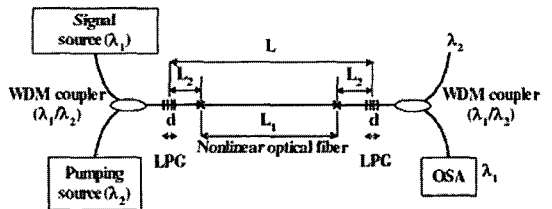


그림 5. 광섬유 장주기 격자 쌍을 이용한 비선형 광섬유의 비선형성 측정 방법. (OSA: Optical Spectrum Analyzer)

빛의 간섭현상을 이용한 측정 방법들에는 Fiber

Mach-Zhender 간섭계[13]와 Twin-core fiber 간섭계 [9] 그리고 Two-mode fiber 간섭계[14]가 있으며, 최근 광섬유 장주기 격자(Long-period fiber gratings, LPG) 쌍을 이용한 방법[15]이 제안되었다. Fiber Mach-Zhender 간섭계는 두 개의 독립적인 광섬유를 3dB 광섬유 커플러에 연결하여 두 광섬유들 사이에서 일어나는 위상 변화를 빛의 간섭을 이용해 측정하는 방법이고 Twin-core fiber 간섭계는 한 광섬유 내에 두 개의 코어가 일정 거리만큼 떨어진 Twin-core fiber를 제작하여 두 코어에 독립적으로 진행한 빛들 사이의 일어나는 간섭 현상을 이용하는 방법이다. Two-mode fiber 간섭계는 광섬유의 도파관 이론에 근거하여 가질 수 있는 첫째 모드와 둘째 모드가 광섬유 코어와 겹치는 부분이 다름을 이용한 방법으로 비선형 광섬유에서 두 모드가 느끼는 위상 차이를 두 모드들 간의 간섭 현상을 통해 구할 수 있다. 마지막으로, 광섬유 장주기 격자 쌍을 이용한 방법은 광섬유의 코어를 지나가는 빛이 광섬유 장주기격자 쌍을 만나게 되면 첫 번째 장주기격자에 의해 일부는 코어로 진행하고 나머지는 클래딩으로 진행하다가 두 번째 장주기격자에 의해 코어와 클래딩으로 진행했던 빛들이 서로 만나서 간섭을 일으키며 코어로 진행하는 특성을 이용한 것이다. 그림 5와 같이 광섬유 장주기격자 쌍 사이에 비선형 광섬유를 연결하고, 광섬유 장주기격자에 영향을 받지 않는 펌프 광원에 의한 비선형 광섬유의 비선형성을 간섭무늬의 파장 이동과 식 (2)를 통해 구한다.

$$n_2 = \frac{A_{eff}}{L_{eff} 2b P_{pump}} \frac{\lambda_p}{S} \Delta\lambda \quad (2)$$

여기서, A_{eff} 와 L_{eff} 는 비선형 광섬유 코어의 유효 단면적과 유효 길이이고 b 는 Signal source와 Pump source 사이의 편광 의존 상수이다. P_{pump} 는 비선형 광섬유로 입사된 펌프 광원의 파워이며 S 는 장주기 격자 쌍에 의해 형성된 간섭무늬의 간섭 간격에 해당한다. λ_p 는 펌프 광원이 없을 때 간섭무늬의 한 파장이고, $\Delta\lambda$ 는 λ_p 의 펌프 광원의 세기에 따른 파장 이동을 나타낸다.

5. 비선형 광섬유의 활용

광통신에서 비선형 광섬유의 활용 범위는 매우 다양하다. Raman scattering 현상을 이용하여 한 파장의 펌프 광원을 이용하여 여러 파장의 광원을 생성시키거나 증폭하는 Raman laser나 Raman amplifier가 있으며, SPM(Self-phase modulation)의 비선형 현상을 이용하여 장거리의 광섬유를 지나도 분산이 거의 일어나지 않는 Soliton과 같은 광원을 생성할 수 있다[11]. 또한, 펌프 광원에 의한 ON-OFF 신호에 따라 광신호의 경로를 원하는 곳으로 바꾸어 줄 수 있는 광스위칭 소자가 있고 펌프 광원의 신호에 따라 광신호를 생성하는 광변조기가 있다. 그 밖에 빛의 파장을 펌프 광원을 이용하여 바꾸어 줄 수 있는 파장 변환기가 있으며, 펌프 광원의 세기에 따라서 광투과 스펙트럼을 자유롭게 변화시킬 수 있는 가변형 광필터나 일정 파장을 갖는 빛의 세기를 조절할 수 있는 가변형 광감쇠기 등에 비선형 광섬유를 이용할 수 있다.

그림 6은 약 0.8at%의 Yb^{3+} 이온이 첨가된 비선형 광섬유와 광섬유 장주기 격자 쌍을 이용하여 가변형 광필터를 구현한 실험 장치 개요도이다. 여기서, 980nm-LD의 파워를 변화시키면, 그림 7과 같이 Yb^{3+} 이온이 첨가된 광섬유를 포함한 광섬유 장주기 격자 쌍에 의해 형성된 광투과 스펙트럼이 변하게 된다. 이와 같은 가변형 광필터는 WDM 시스템에 필요한 다파장 광원의 생성에 활용할 수 있다.

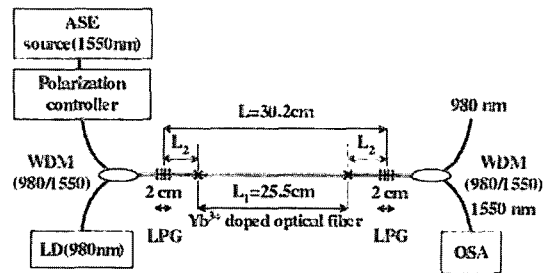


그림 6. 0.8at%의 Yb^{3+} 이온이 첨가된 비선형 광섬유와 광섬유 장주기 격자 쌍을 이용한 가변형 광필터 구현을 위한 실험 장치 개요도.(ASE: Amplified Spontaneous Emission)

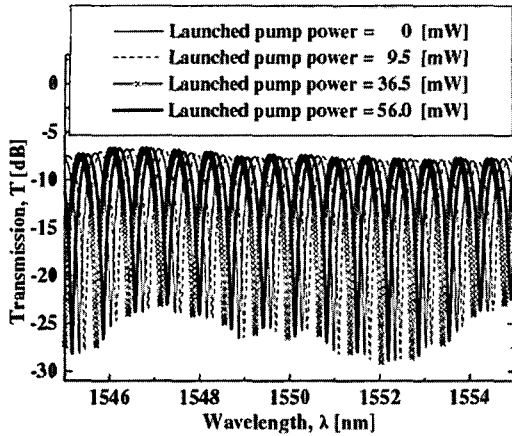


그림 7. 그림 6의 가변형 광필터의 펄프 광원의 세기에 따른 광필터의 광투과 스펙트럼.

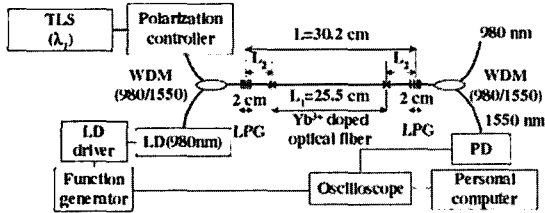


그림 8. Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유와 광섬유 장주기 격자 쌍을 이용한 ON-OFF 광스위칭 소자 구현을 위한 실험 장치 개요도. (TLS: Tunable Laser Source, PD: Photo-Detector)

그림 8은 그림 6에 사용된 동일한 Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유와 광섬유 장주기 격자 쌍을 이용해 ON-OFF 광스위칭 소자를 구현한 실험 장치 개요도이다[16]. Yb³⁺ 이온이 첨가된 광섬유를 포함한 장주기 격자 쌍에 1550nm 근방의 λ_2 의 파장을 갖는 연속 광원(TLS)과 Function generator를 이용해 방형파로 변조시킨 980nm의 펄프 광원을 동시에 입사시키면, 그림 9와 같이 1550nm 근방의 TLS 광원이 펄프 광원의 ON-OFF 신호에 따라 ON-OFF됨을 알 수 있다. 한편, 펄프 광원의 방형파 주파수가 250Hz일 때 TLS 광원의 ON-OFF 신호가 펄프 광원의 ON-OFF 신호를 따라가지 못함을 볼 수 있는데, 이는 Yb³⁺ 이온이 갖는 공진형 비선형성의 특징에 기인한다. 더욱 빠른 응답 속도를 갖는 광스위칭 소자의 구현을 위해서는 응답 특성이 우수한 공진형 비선형성을 갖는

반도체와 같은 물질이 도핑된 광섬유나 비공진형 비선형성을 갖는 비선형 광섬유를 활용해야 한다.

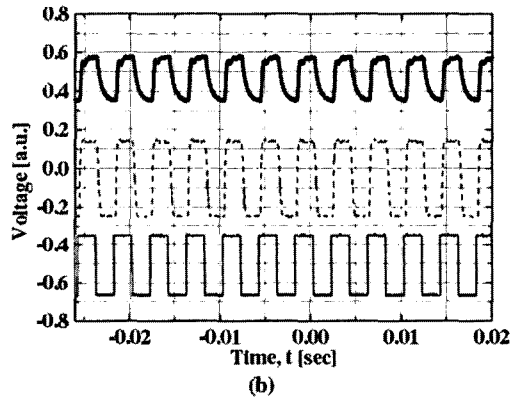
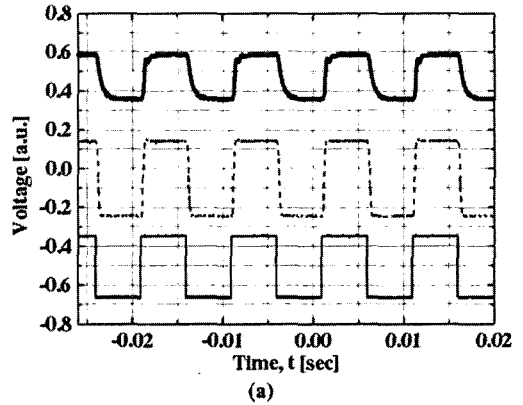


그림 9. 그림 8에서 Function generator 이용해 생성한 (a) 100Hz와 (b) 250Hz의 펄프 광원의 방형파에 따른 1550nm 근방의 연속 광원(TLS)의 ON-OFF 광스위칭 결과. (굵은 실선: TLS 광원, 점선: 펄프광원, 가는 실선: Function generator 신호)

6. 결론

지금까지 간략하게 비선형 광섬유를 중심으로 광섬유에서의 비선형 광학 특성과 비선형 광섬유의 종류 및 제작 방법, 그리고 비선형 광섬유의 평가방법과 활용 예들을 살펴보았다. 광섬유의 비선형 광학 특성은 광통신 기술에 있어서 다양한 광소자로의 활용 가능성 때문에 많은 연구가 이루어져 왔지만, 주

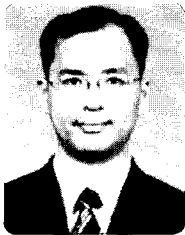
로 연구실 수준에서 머물고 있다. 이는 실용화를 위해서는 더욱 많은 연구들이 필요하다는 것을 반증한다. 앞으로는 비선형 광섬유를 이용한 많은 연구들이 연구실 수준을 넘어 상용화에 성공하여 광통신 기술의 재도약에 기여하길 기대해 본다.

참고 문헌

- [1] K. Uesaka, K. K. Y. Wang, M. E. Marhic, and L. G. Kazovsky, "Polarization-insensitive wavelength exchange in highly-nonlinear dispersion shifted fiber", in Tech. Dig. of OFC 2002, Anaheim, pp. 563-564, 2002.
- [2] M. J. F. Digonnet, R. W. Sadowski, H. J. Shaw, and R. H. Pantell, "Resonantly enhanced nonlinearity in doped fibers for low-power all-optical switching: a review", Optical Fiber Technol., Vol. 3, pp. 44-64, 1997.
- [3] E. M. Vogel, M. J. Weber, and D. M. Krol, "Nonlinear optical phenomena in glass", Physics. Chem. Glasses, Vol. 32, pp. 231-254, 1991.
- [4] S. Radic, C. J. McKinstrie, R. M. Jopson, J. C. Centanni, and A. R. Chraplyvy, "All-optical regeneration in one- and two-pump parametric amplifiers using highly nonlinear optical fiber", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 15, pp. 957-959, 2003.
- [5] J. E. Townsend, S. B. Poole, D. N. Payne, "Solution doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers", Electron. Lett. Vol. 23, pp. 329-331, 1987.
- [6] T.F. Morse, A. Kilian, L. Reinhart, W. Risen, and J.W. Cipolla, "Aerosol doping technique for MCVD and OVD", in Fiber Laser Sources and Amplifiers, M.J.F. Digonnet, Ed., Proc. SPIE 1171, pp.72-79, 1989.
- [7] Y. H. Kim, U.-C. Paek, and W.-T. Han, "Effect of soaking temperature on erbium doping of optical fiber core in MCVD solution doping process", Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 7, pp. 150-155, 2003.
- [8] J. S. Cho, U.-C. Paek, W.-T. Han, and J. Heo, "Fabrication and heat treatment effects on absorption characteristics of glass fibers doped with PbTe semiconductor quantum dots", in Tech. Dig. of OFC 2001, Anaheim, pp. ThC4-1-ThC4-3, 2001.
- [9] J. W. Arkwright, P. Elango, G. R. Atkins, T. Whitbread, and M. J. F. Digonnet, "Experimental and theoretical analysis of the resonant nonlinearity in ytterbium-doped fiber", J. Lightwave Technol., Vol. 16, pp. 798-806, 1998.
- [10] Y. H. Kim, U.-C. Paek, and W.-T. Han, "Absorption and emission properties of Tm²⁺ ions in germanosilicate glass fibers", Opt. Express, Vol. 11, pp. 2672-2678, 2004.
- [11] G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics", Academic press, New York, 1995.
- [12] H. M. Gibbs, G. Khitrova, N. Peyghambarian, "Nonlinear photonics", Springer-Verlag, Ch. 11, 1990.
- [13] S. C. Fleming and T. J. Whitley, "Measurement and analysis of pump-dependent refractive index and dispersion effects in erbium-doped fiber amplifiers", IEEE J. Quant. Electron., Vol. 32, pp. 1113-1121, 1996.
- [14] R. H. Pantell, R. W. Sadowski, M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw, "Laser-diode-pumped nonlinear switch in erbium-doped fiber", Opt. Lett., Vol. 17, pp. 1026-1028, 1992.
- [15] Y. H. Kim, B. H. Lee, Y. Chung, U. C. Paek, W.-T. Han, "Resonant optical nonlinearity measurement of Yb³⁺/Al³⁺ codoped optical fibers by use of a long-period fiber grating pair", Opt. Lett., Vol. 27, pp. 580-582, 2002.

[16] Y. H. Kim, N. S. Kim, Y. Chung, U.-C. Paek, and W.-T. Han, "All-optical switching application based on optical nonlinearity of Yb³⁺ doped aluminosilicate glass fiber with a long-period fiber gratings pair", Opt. Express, Vol. 12, pp. 651-656, 2004.

저|자|약|력



성 명 : 김 윤 현

- ◆ 학 력
- 1997년 서강대 물리학과 이학사
- 1999년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사
- 2004년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사

◆ 경 력

· 2004년 ~ 현 재 LG전선 통신연구소 선임연구원



성 명 : 오 경 환

- ◆ 학 력
- 1986년 서울대 물리학과 이학사
- 1988년 서울대 물리학과 이학석사
- 1991년 Brown Univ. 물리학과 공학석사
- 1994년 Brown Univ. 물리학과 이학박사

◆ 경 력

· 1994년 ~ 1996년 LG전선 광통신연구소 선임연구원
 · 1996년 ~ 현 재 광주과학기술원 정보통신공학과 교수
 · 2000년 ~ 2002년 미국 Lucent Bell Lab 초빙연구원
 독일 Alexander von Humboldt Research Fellow
 영국 Chevening Scholar
 일본 JSPS Invitation Fellow

