

論文2002-39SD-1-7

광섬유 루프미러내의 편광제어기와 SOA를 이용한 XPM 방식 파장변환기

(XPM mode Wavelength Converter using Polarization Controller and SOA within Optical Fiber Loop Mirror)

李承祐*, 李正烈*, 尹慶毛**, 李慵基**, 嚴震燮***

(Seung Woo Yi, Jung Ryul Lee, Kyeong Mo Yoon, Yong Gi Lee, and Jinseob Eom)

요 약

본 논문에서는 광섬유 루프미러내에서 편광제어기를 사용하여 SOA내에서의 XPM을 조절할 수 있는 RZ 데이터용 파장변환기를 제안하였으며, 이의 동작을 실험을 통하여 확인하였다. 제안된 방법은 기존의 XPM 구조에 비하여 한 개의 SOA를 필요로 하며 보다 저가인 편광의존형 SOA를 요구한다. 그리고 입력 데이터에 대하여 반전 및 비반전된 파장변환 출력 신호형태들을 동시에 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있다.

Abstract

In this paper, a wavelength converter for RZ data which can controls XPM in SOA by using polarization controller within optical fiber loop mirror is proposed and demonstrated. The proposed structure needs only one polarization dependent SOA for implementation compared to previous XPM ones and makes the cost down. And it provides wavelength converted signals with non-inverted and inverted pattern into outputs respectively.

I. 서 론

근간의 통신수요에 대한 폭발적 증가는 ATM 교환

* 正會員, 江原大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Kangwon National University)

** 正會員, 韓國通信 加入者網研究所 全光通信網 研究室 (Korea Telecom)

*** 正會員, 江原大學校 電氣電子情報通信工學部 (Dept. of Electrical and Computer Eng., Kangwon National University)

※ 본 연구는 한국통신 가입자망연구소의 용역계약에 의한 지원금 일부와 광주과학기술원 초고속광네트워킹연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 일부에 의한 것입니다.

接受日字:2001年3月6日, 수정완료일:2001年11月13日

기술, IMT-2000, LMDS 등 무선통신기술과 함께 광통신 분야에 있어서도 대용량, 초고속 기술을 요구하고 있다. 이러한 대용량 요구는 광섬유의 광범위한 대역폭을 충분히 활용하기 위하여 시간분할 다중화 기술과 파장분할 다중화 기술이 접목된 기술들이 미래의 광통신 기술의 핵심이 될 것으로 예상된다.

파장분할 다중화 방식(Wavelength Division Multiplexing ; WDM)은 광섬유의 저 손실 파장대역을 여러 개의 좁은 채널파장 대역으로 분할하여 각 입력 채널마다 하나의 파장대역을 할당하고 입력채널 신호들을 할당된 채널 파장대역을 통하여 동시에 전송하는 광전송방식이다. 파장분할 다중화 전송방식은 완전히 수동소자로 구성될 수 있다는 특성뿐만 아니라 각 파장채널은 서로 독립적이며 전송 데이터 형식에 무관하다는

투명성(transparency)이 있어 아날로그 신호와 디지털 신호를 동시에 전송할 수 있고 또한 서로 다른 전송률의 신호들을 함께 전송할 수 있다는 장점이 있다.

이처럼 WDM 방식을 사용하는 초고속 정보통신망에서 파장변환기는 OXC(Optical Cross Connector)와 광교환기와 같은 WDM 시스템들을 구성하기 위한 필수 요소모듈이다^[1]. WDM 시스템을 위한 전광(全光)변환은 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)를 주 소자로 사용하게 된다. SOA를 사용한 전광 파장변환방법은 크게 XGM(Cross-Gain Modulation), XPM(Cross-Phase Modulation), FWM(Four-Wave Mixing)을 들 수 있다^[2].

본 논문에서는 전광(全光) 파장변환기 구성에 있어서 XPM 방식을 사용한 새로운 구조를 제안하였고 실험을 통하여 제안된 구조를 검증하였다.

본 논문의 구성으로 먼저 II장에서는 SOA를 이용한 3가지 파장변환 방법들에 대한 이론적 검토를 하였다. III장에서는 기존의 구조에 비해 장점이 있는 XPM 방식 파장변환 시스템을 제안하였으며, IV장에서는 이의 동작을 실험으로 확인하고 그 결과를 논하였다. 그리고 V장에서는 결론을 맺었다.

II. SOA를 이용한 파장변환 방법

전광 파장변환 시스템에서 각광을 받고있는 소자는 SOA이다. SOA는 증폭소자로서 뿐만 아니라 게이트소자 및 인가된 빛에 의한 비선형 특성소자로서 광범위하게 사용되고 있다. SOA를 이용하여 파장변환을 수행할 경우, 시스템의 부피를 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 제어 및 구성이 비교적 간단하여 이를 이용한 파장 변환에 대하여 많은 시도가 이루어지고 있다.

SOA를 이용한 파장변환 방법으로는 XGM을 이용하는 방법, XPM과 간섭계를 이용하는 방법, FWM을 이용하는 방법 등이 있다. 다음에서는 각각의 파장변환 방법에 대해 간략히 살펴보도록 하겠다.

1. XGM에 의한 파장변환 방법

SOA내에서의 유도방출률은 펄핑 광신호의 입력파위에 관련되어 있다. 펄핑 광신호의 입력파위가 높을수록 SOA의 활성영역에 있는 캐리어는 유도방출현상에 의해 그만큼 빨리 고갈되는데, 이는 결국 프로브신호에 대한 SOA의 이득을 감소시키게 된다. 이러한 효과를

이득포화라고 한다^[3].

이러한 이득포화 현상은 한 펄핑신호의 파장으로부터 프로브신호의 파장으로 데이터를 변조하는 파장변환에 사용될 수 있다. XGM을 이용한 파장변환기 구현은 SOA와 필터만으로도 구성이 가능하다. 그러나 이득포화 현상을 이용하게 되므로 파장에 따른 이득 곡선의 차이로 인하여 파장에 따라 소멸률(extinction ratio)이 불안한 특성을 갖는다. 또한 입력신호의 데이터 포맷은 이득을 포화시킬 수 있도록 진폭 변조된 신호라야만 한다. 이 외에도 피변조파(프로브신호)는 SOA 굴절률 변화현상으로 처핑(chirping)이 발생한다. 이러한 처핑현상은 펄핑신호 파장이 CW(Continuous Wave) 파장보다 단파장일 때 두드러진 현상을 보인다. 따라서 입력된 펄핑 신호의 파장보다 더 짧은 파장의 프로브 CW를 사용한다.

2. XPM에 의한 파장변환 방법

SOA에서의 XGM을 이용한 파장변환기의 경우 캐리어 밀도변화로 인하여 이득변조와 함께 굴절률의 변화도 수반된다. 이러한 굴절률의 변화는 XGM을 이용하는 경우와는 별개로 위상변화를 초래한다. 서로 다른 두 빛이 SOA로 인가될 경우, SOA 활성영역은 빛의 세기에 따라 굴절률이 변하게 되고, 이러한 효과는 두 빛 사이에 XPM을 야기시킨다. 다음 식은 서로 다른 두 빛 E1과 E2가 SOA로 인가되었을 때 굴절률의 변화 Δn_j 과 이에 따른 위상변화의 관계를 나타낸 것이다.

$$\Delta n_j = \frac{\epsilon_j^{NL}}{2n_j} \approx n_2(|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2) \quad (1)$$

$$\phi_j^{NL} = \frac{\omega_j z}{c} \Delta n_j = \frac{\omega_j z n_2}{c} [|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2] \quad (2)$$

(단 $j=1$ or 2)

위에서도 알 수 있듯이 굴절률의 변화에 따른 위상의 변화는 자신의 파위에 의해서 뿐만 아니라, 다른 빛의 파위에 의해서도 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 이처럼 위상변화가 발생한 빛을 간섭계를 이용하여 위상변화가 없는 빛과 간섭현상을 일으킬 경우, 출력형태는 두 빛간의 위상 차에 관련되어 나타나게 되는데, 이러한 성질은 간섭계에 파장변환기에 응용될 수 있다. 따라서 이 방법은 간섭계의 형태에 따라 다양한 구조가 가능한데, 이에 대해서는 III장에서 다루기로 하겠다. 이처럼 XPM에 의한 방법은 이득변조를 이용하는 것이 아니라 굴절률의 변화에 의한 위상변화를 이용하기 때

문에, 파장변환시스템 자체의 잡음은 XGM보다 대폭 감소된다.

3. FWM에 의한 파장 변환방법

지금까지 알아본 파장변환기의 경우 입력데이터의 포맷에 제약조건이 따름을 알 수 있다. 이러한 방법과 달리 FWM을 이용한 파장변환은 입력데이터의 포맷에 제약이 따르지 않으며, 변환된 신호는 본래 신호의 광위상보상(Optical Phase Conjugation)형태를 나타낸다^[4, 5].

펌프파와 프로브파가 SOA내에서 FWM을 거친 결과는 서로 다른 4개의 파장을 가지는 파들을 출력시킨다. 펌프파 ω_p 는 프로브파 ω_s 와 새로운 주파수 $\omega_{cs} = 2\omega_p - \omega_s$ 로 산란되며, 프로브파는 펌프파와 또 다른 주파수 $\omega_{cs} = 2\omega_s - \omega_p$ 로 산란된다. 여기서 P_p 는 강한 펌프빔, P_s 는 프로브빔, P_{cs} 는 신호원에 대한 광위상보상 형태로 생성된 새로운 빔을 나타낸다^[6]. 그러나 파장간의 간격이 좁은 경우에 이중에서 P_{cs} 만을 필터링 하는 것이 어려울 뿐만 아니라, P_{cs} 의 광파워가 매우 작아서 불안정한 필터링 후에는 강한 펌프파가 여전히 존재할 수 있고, 적은 P_{cs} 광파워를 증폭하여야 하는 어려움이 존재한다.

III. 제안된 XPM 방식 파장변환기

입력된 신호가 IM(Intensity Modulation) 방식에 의한 데이터인 경우에 XPM을 이용한 파장변환시스템은 SOA에서의 굴절률 변화를 통해 위상변조만을 초래하기 때문에 간섭계를 필요로 한다. 이러한 간섭계로는 마하젠더 간섭계, 마이켈슨 간섭계 등이 사용된다.

본 장에서는 먼저 마하젠더 간섭계 및 마이켈슨 간섭계를 이용한 기존의 파장변환기의 구성에 대해 알아본 다음, 본 논문에서 제안된 XPM 방식 파장변환기에 대해 살펴보도록 하겠다.

1. 마하젠더 간섭계 또는 마이켈슨 간섭계를 이용한 기존의 XPM 파장변환기 구조

XPM에 의하여 신호들 간에 위상을 조절해 주고 이를 간섭계에 통과시키므로써 원하는 출력형태를 생성시킬 수 있다. 그림 1의 마하젠더 간섭계를 이용한 파장변환기를 살펴보면, 위쪽 팔의 SOA에 광신호와 CW가 동시에 입사되면 이에 따른 SOA내의 굴절률 변화로 인하여 위쪽 팔을 지나는 CW에 위상변화를 일으킨

다. 따라서 두 개의 경로로 나뉘어 진행되는 CW는 각 팔의 SOA를 거치면서 두 경로간에 위상차가 생기게 된다. 그리고 마하젠더 간섭계의 출력에서는 두 빛간에 간섭현상이 나타나게 되는데, CW가 출력단에서 상쇄간섭으로 나타날 것인지, 보강간섭으로 나타날 것인지는 전적으로 신호의 광파워에 관련되게 된다.

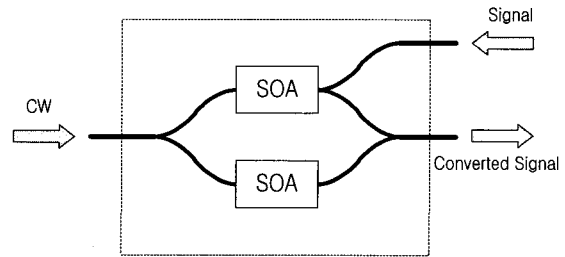


그림 1. 마하젠더 간섭계를 이용한 파장변환기
Fig. 1. Wavelength converter using Mach-Zehnder interferometer.

마하젠더 간섭계의 입력파워와 출력파워와의 관계는 식(3)과 같이 쓸 수 있다. 여기서 G_1 과 G_2 는 각각 두 SOA의 이득을 나타낸 것이다. P_{in} 과 P_{out} 은 CW의 입력파워와 출력파워를 나타낸 것이며, ϕ 는 입력신호의 광파워에 직접 비례하는 위상차를 나타낸다^[7].

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{8} (G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1 G_2} \cos \phi) \quad (3)$$

위 식(3)에서 두 SOA의 이득이 같다면 이는 다시 식(4)처럼 나타낼 수 있다.

$$P_{out} \approx \frac{P_{in}}{4} G_1 (1 + \cos \phi) \quad (4)$$

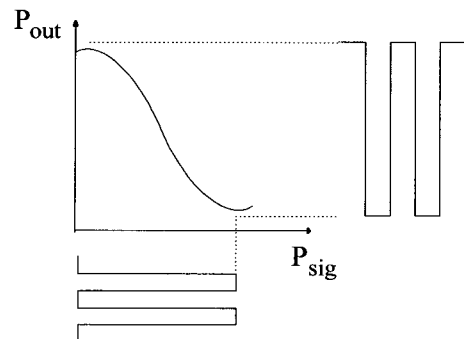


그림 2. XPM 및 간섭계를 통한 전달함수 특성곡선
Fig. 2. Transfer function curve for method using XPM and interferometer.

이러한 위상차에 의해서 출력단에서 야기되는 광파위의 변화는 그림 2에 보인 것처럼 정현파적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 적절한 동작조건하에서 그림 2와 같은 특성이 유지될 경우 파장변환된 출력 데이터의 형태는 입력신호의 것과 반전되어 출력됨을 알 수 있다.

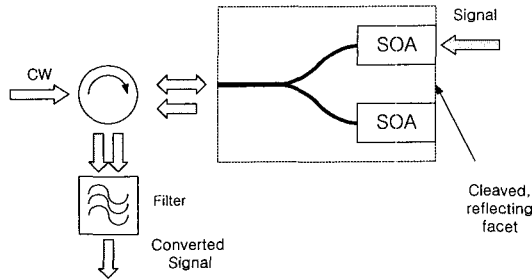


그림 3. 마이켈슨 간섭계를 이용한 파장변환기
Fig. 3. Wavelength converter using Michelson interferometer.

그림 3은 마이켈슨 간섭계를 이용한 파장변환 구조를 나타낸 것이다. 이러한 구조는 피변조파와 변조파의 진행방향이 동일함으로 인해 항상 필터를 수반하게 된다.

앞의 두 구조에서 살펴본 바와 같이 XPM에 의한 기존의 파장변환기는 두 개의 SOA 그리고 이 두 SOA를 거친 빛들이 서로 간섭현상을 일으키기 위한 간섭계로 구성된다. 그러나 최고의 효율을 얻기 위해서는 두 SOA의 특성이 동일할 것을 요구하며, 또한 간섭계의 구조특성상 두 팔의 경로에 대한 정확한 길이 제어가 요구된다. 이러한 간섭계의 출력은 신호 빛이 없으면 두 SOA를 통한 진행거리가 같으므로 출력된 빛은 보강간섭을 일으키고, 신호 빛에 의한 제어는 상쇄간섭의 정도를 제어하는 구조가 된다. 따라서 출력된 데이터는 입력된 데이터에 대해 반전된 형태가 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 점들이 개선된 구조의 XPM 방식 파장변환기를 제안하였다.

2. 제안된 XPM 방식 파장변환기

본 논문에서는 광섬유 루프미러내에 위치한 SOA에서 일어나는 XPM과 편광제어기(Polarization Controller ; PC)의 조정에 의하여 RZ(Return-to-Zero) 패턴의 입력 신호를 동일한 형태의 RZ 신호로 파장변환시키기 위한 구조를 제안하였으며, 이를 실험적으로 입증하였다.

그림 4는 루프미러내에 SOA 및 편광제어기를 위치시켜 RZ 형태의 입력 데이터에 대하여 XPM을 이용한

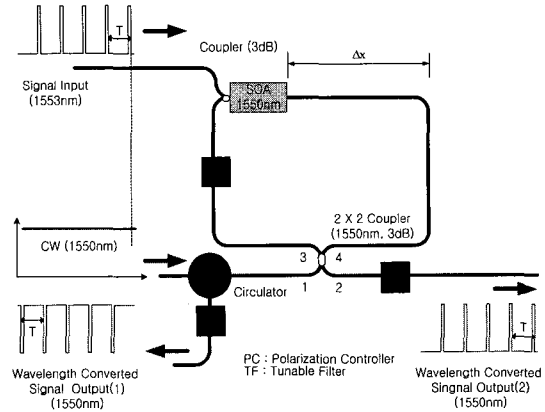


그림 4. XPM을 이용한 제안된 파장변환 실험 구성도
Fig. 4. Experimental set-up for proposed wavelength conversion using XPM.

파장변환 시스템의 구조를 나타낸 것이다. 제안된 파장변환 구조는 기존의 XPM을 이용하는 구조들에 비해 고가의 SOA 소자수를 절반으로 감소시키며 입력 RZ신호와 같은 형태(비반전)의 데이터를 출력에서 얻을 수 있도록 하였다. 루프내의 SOA는 그림에서 보는 바와 같이 루프입력으로부터 SOA의 좌와 우까지의 거리차가 Δx 가 되도록 하였다. 여기서 RZ 입력 데이터의 펄스 폭을 τ 라하고 주기를 T라고 하면, 비대칭길이 Δx 는 τ 보다는 크고 ($T - \tau$) 보다는 작은 시간지연을 제공하여야 한다.

제안된 구조의 동작원리를 설명하면 다음과 같다. 루프미러내로 입력된 CW 신호는 2×2 3dB 광섬유 커플러를 통과한 후에 각각 시계방향과 반시계방향으로 진행하게 된다. 이때 SOA로 입사되는 입력 데이터 신호와 편광제어기가 없다면, 각 방향의 진행과는 루프내에서 각각 나뉠대로 위상변화를 겪게 된다. 따라서 출력단에서 두 진행파간의 위상차는 광섬유내에서 두 방향간의 위상차와 2×2 3dB 광섬유 커플러에 의하여 겪게 되는 위상차에만 좌우된다. 한편 입력 데이터 신호와 CW 신호가 SOA에 동시에 인가되면 식(1)에 의하여 SOA의 굴절률이 변하게 되며, 따라서 SOA를 통과하는 CW 신호는 위상변화를 겪게 된다. 이를 좀 더 자세히 살펴보면, 입력 데이터 신호와 동시에 SOA를 통과하는 CW에는 두 가지가 있다. 하나는 시계방향의 CW이며, 이와 동시에 출발한 반시계방향의 CW는 Δx 에 의한 지연에 의하여 SOA를 동시에 통과할 수 없다. 또 다른 하나는 이보다 앞서 광섬유 루프에 입사되었던(선입력) 반시계방향의 CW이며, 이는 Δx 에 의한 지연 때문에

자기보다 늦게 입사된 시계방향 CW와 동시에 SOA를 통과하게 된다. 이로 인하여 입력 데이터 신호와 동시에 SOA를 통과하는 두 가지의 CW는 모두 위상변화를 겪게 되며, 이들은 각각 개별적으로 2×2 3dB 광섬유 커플러의 출력(2)에서 루프에 동시에 입사되었던 반대 방향의 CW와 간섭을 일으키게 된다. 따라서 출력(2)에서는 두 개의 파장변환된 신호가 연속해서 출력되며, 두 신호간의 간격은 Δx에 의한 시간지연과 같다.

그런데 우리에게 필요한 출력은 그 중에 하나이므로 다른 하나는 원치 않는 dummy 데이터 신호이며 이는 제거되어야 한다. 이를 제거하기 위하여 본 논문에서는 광섬유 루프내에 편광제어기를 두었으며 SOA의 편광 의존성을 이용하였다. 이에 대한 설명은 뒤에서 다루도록 하겠다. 따라서 편광제어기의 적절한 조절에 의하여 dummy 데이터를 제거할 수 있으며, 출력단(1)은 입력된 신호의 반전 형태로, 출력단(2)는 입력신호와 같은 형태(비반전 형태)로 출력된다.

표 1에서는 그림 4의 루프로 입력된 CW 빛의 두 진행방향(시계방향과 반시계방향) 각각에 대하여 일어날 수 있는 위상변화를 정리하였다. 조건 I은 SOA내에 데이터 신호가 존재하지 않을 경우, II는 SOA내에 데이터 신호가 존재할 경우에 대한 시계방향 CW의 위상변화를 나타내었다. 조건 III은 SOA내에 데이터 신호가 존재하지 않을 경우, IV는 SOA내에 데이터 신호가 존재할 경우에 대한 반시계방향 CW의 위상변화를 나타낸다.

일반적으로 광섬유 루프미러는 광섬유의 복굴절로 인하여 루프내로 입사되는 CW 빛의 편광에 따라 루프미러의 출력이 영향을 받는다^[8]. 이는 양방향으로 진행되는 두 빛간에 위상차가 존재함을 의미한다. 이로부터 시계방향의 CW에 대하여 Δφ_{F1}는 진행방향에 관계없이 2×2 3dB 광섬유 커플러 3번과 편광제어기 사이의 광섬유내에서, Δφ_{F2}는 편광제어기와 SOA 사이의 광섬유에서, 그리고 Δφ_{F3}는 SOA와 2×2 3dB 광섬유 커플러 4번 사이의 광섬유에서 일어나는 위상변화로 나타내었다. 그리고 반시계방향에 대하여는 각각 같은 구간에 대하여 Δφ_{F1}와 Δφ_{F2}, 그리고 Δφ_{F3}로 나타내었다. 편의상 Δφ_{F1}+Δφ_{F2}+Δφ_{F3}=Δφ_F와 Δφ_{F1}+Δφ_{F2}+Δφ_{F3}=Δφ_F으로 표시하였으며, 따라서 Δφ_F와 Δφ_F는 시계방향과 반시계방향 CW가 광섬유내에서 겪을 수 있는 총 위상변화량이다.

2×2 3dB 광섬유 커플러에서는 입사 빛이 평행으로 진행할 때에는 위상변화가 일어나지 않지만, 교차하여 진행할 때에는 π/2 만큼의 위상변화를 겪게 된다.

Δφ_{PC}는 시계방향의 CW가 편광제어기를 통과하면서 겪게 되는 위상변화를 나타낸다. 그러나 편광제어기는 가역성이 성립하므로 반시계방향의 CW가 편광제어기를 통과하면서 겪게 되는 위상변화는 Δφ_{PC}와 같다.

SOA내에서는 데이터 광 신호의 존재유무에 따라서 진행되는 CW 빛이 겪게되는 굴절률이 다르다. 보통 SOA내에 데이터 광 신호가 존재하게 되면 데이터 광 신호가 이득을 얻게되기 때문에 SOA내의 캐리어의 수는 줄어들고, 이는 SOA의 굴절률을 증가시키게 된다. 편광의존형 SOA의 경우에는 SOA가 정상상태에 있을 때 CW의 편광에 따라서 SOA의 굴절률 또한 다르게 된다. 본 논문의 구조에서는 편광제어기를 사용하여 SOA에 입사되는 CW의 편광을 조절할 수 있으므로 CW가 SOA를 통과하며 겪게되는 굴절률을 시계방향과 반시계방향 그리고 데이터 광 신호의 존재유무 등의 4가지 조합의 경우로 나눌 수 있다. 이는 4가지 경우의 CW 각각에 대하여 SOA내에서 겪는 위상변화가 다를 수 있다는 것을 의미하며, 이를 표 1에서는 각각 Δφ_{SOA,WO}, Δφ_{SOA,W}, Δφ_{SOA,WO}, 그리고 Δφ_{SOA,W} 등으로 나타내었다.

표 1에서 알 수 있듯이 시계방향과 반시계방향의 CW 빛이 SOA를 통과할 때 일어나는 두 방향간의 위상차는 간섭계의 출력에 그대로 반영이 된다. 이제 식 (5)에 이러한 위상차를 나타내었다.

$$\Delta\phi_{SOA} = k_0 \Delta n l \tag{5}$$

위 식에서 k₀와 l은 각각 공기 중에서의 웨이브벡터(wavevector)와 SOA 칩의 길이를 나타낸다. Δn은 시계방향과 반시계방향의 CW 빛이 각각 SOA를 통과하면서 겪게 되는 굴절률의 차를 나타낸다.

위와 같은 조건들을 고려하여 그림 4의 광섬유 루프미러에 입사된 CW 빛이 시계방향과 반시계방향으로 루프를 거친 후에 2×2 3dB 광섬유 커플러의 출력(2)로 출력되는 정도를 나타내는 투과율 T는 다음과 같이 된다^[8].

$$T = \frac{1}{2} [1 + V \cos(\Delta\phi_{total})]$$

표 1. CW 신호의 진행방향에 따른 위상변화
Table 1. Phase shift corresponding to traveling direction of CW signal.

<시계방향 진행에서의 위상변화>

조건 (데이터 빛이 SOA내에)	각 단계에서의 위상변화						총 위상변화
	1 → 3	→ PC	→ SOA	→ 4	→ 2		
I : 존재하지 않을 때		$\Delta\phi_{F1}$	$\Delta\phi_{PC}$	$\Delta\phi_{P2}$	$\Delta\phi_{SOA,WO}$	$\Delta\phi_{P3}$	$\Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,WO}$
II : 존재할 때		$\Delta\phi_{F1}$	$\Delta\phi_{PC}$	$\Delta\phi_{P2}$	$\Delta\phi_{SOA,W}$	$\Delta\phi_{P3}$	$\Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,W}$

<반시계방향 진행에서의 위상변화>

조건 (데이터 빛이 SOA내에)	각 단계에서의 위상변화						총 위상변화
	1 → 4	→ SOA	→ PC	→ 3	→ 2		
III : 존재하지 않을 때	$\frac{\pi}{2}$	$\Delta\phi_{F1}$	$\Delta\phi_{SOA,WO}$	$\Delta\phi_{P2}$	$\Delta\phi_{PC}$	$\Delta\phi_{F1}$	$\pi + \Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,WO}$
IV : 존재할 때	$\frac{\pi}{2}$	$\Delta\phi_{F1}$	$\Delta\phi_{SOA,W}$	$\Delta\phi_{P2}$	$\Delta\phi_{PC}$	$\Delta\phi_{F1}$	$\pi + \Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,W}$

여기서, $\Delta\phi_{F1} + \Delta\phi_{P3} + \Delta\phi_{P2} = \Delta\phi_F$, $\Delta\phi_{P1} + \Delta\phi_{P2} + \Delta\phi_{P3} = \Delta\phi_{PC}$

$$\Delta\phi_{total} = \pi + \Delta\phi_{SOA} - \epsilon \tag{6}$$

여기서 $\Delta\phi_{total}$ 은 루프미러내에서 양방향간의 총 위상차를 나타낸다. V 는 간섭계의 visibility를 나타내며 1보다 작거나 같은 양수이다. ϵ 은 루프의 광섬유내에서 일어나는 양방향간의 위상차와 관련된다. $\Delta\phi_{SOA}$ 는 SOA내에서 야기되는 두 방향간의 위상차로서, 식(5)에 나타내었다. V 와 ϵ 은 광섬유의 복굴절과 CW 빛의 편광에 따라 변하는 값이며, $\Delta\phi_{SOA}$ 역시 편광의 함수이다. 그러나 $\Delta\phi_{SOA}$ 값에 의해 출력의 큰 줄기가 결정되고 ϵ 은 이로부터 약간의 변화를 가져온다. 따라서 본 논문에서는 큰 잘못이 없는 범위내에서 해석의 간편을 위하여 편광에 따른 $\Delta\phi_{SOA}$ 값의 변화만을 고려하고 ϵ 값의 변화는 무시하도록 하겠다. 이는 표 1에서 $\Delta\phi_F \approx \Delta\phi_{F1}$ 임을 의미한다.

앞부분에서 설명한 바와 같이 원치 않는 dummy 데이터 출력을 제거하기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되도록 편광제어기를 조절하여야 한다. 예를 들어 두 개의 인접한 출력신호 중에서 앞서 나오는 출력신호를 dummy 출력이라 생각하고 이를 제거하는 경우를 생각해보자. 이를 위해서는 선입력된 CW 빛에 의한 출력을 제거하여야 한다. 이는 선입력된 CW가 양방향으로 루프를 거친 후 2x2 3dB 광섬유 커플러에서 간섭할 때에 양방향의 위상차가 π 가 될 것을 요구한다. 따라서 SOA내에 데이터 신호가 존재하지 않을 때의 시계방향 CW 빛(표 1의 조건 I)의 총 위상변화와 SOA내에 데이터 신호가 존재할 때의 반시계방향 CW 빛(표 1의 조건 IV)의 총 위상변화간의 차인 총 위상차

$\Delta\phi_{total}$ 이 π 가 되어야 한다.이 조건은 표 1에서 $\Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,WO} - (\pi + \Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,W}) = \pi$ 이므로, 이를 정리하면 식(7)과 같은 조건이 되며, 이를 만족하도록 편광제어기를 조정하면 된다.

$$\Delta\phi_{SOA,WO} = \Delta\phi_{SOA,W} \tag{7}$$

한편 파장변환된 출력신호가 최대로 출력되기 위해서는 입력된 CW가 시계와 반시계방향으로 각각 루프를 진행한 후 2x2 3dB 광섬유 커플러에서 간섭할 때에 양방향의 위상차가 0 또는 2π 의 정수배가 될 것을 요구한다. 따라서 SOA내에 데이터 신호가 존재할 때의 시계방향 CW 빛(표 1의 조건 II)의 총 위상변화와 SOA내에 데이터 신호가 존재하지 않을 때의 반시계방향 CW 빛(표 1의 조건 III)의 총 위상변화간의 차인 총 위상차 $\Delta\phi_{total}$ 이 0 또는 2π 의 정수배가 되어야 한다.

이는 표 1로 부터 $\Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,W} - (\pi + \Delta\phi_F + \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{SOA,WO}) = 0$ 이므로, 이를 정리하면 식(8)과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\Delta\phi_{SOA,W} + \Delta\phi_{SOA,WO} = \pi \tag{8}$$

가장 좋은 출력을 위해서는 편광제어기를 사용하여 식(7)과 식(8)을 동시에 만족시키는 것이 최선이지만 이는 어려운 것으로 생각된다. 출력에서 dummy 데이터 신호는 필히 제거되어야 하므로 편광제어기는 우선적으로 식(7)을 만족시키도록 조정이 되어야 하며, 따라서 파장변환된 출력신호는 최대에 미치지 못하는 광파워로 출력된다. 이는 앞으로 제안된 구조가 개선되기 위해 더욱 연구되어야 할 부분으로 사료된다.

본 구조에서는 SOA의 편광의존성을 이용하여 dummy 출력을 제거하기 때문에 일반적인 경우와는 달리 오히려 편광의존성 SOA가 요구된다. 이는 편광무관형 SOA에 비하여 제작이 쉽고 따라서 가격이 저렴하기 때문에 제안된 구조의 장점으로 작용한다.

일반적으로 SOA 내에 적정한 세기의 입력 데이터 광 신호와 CW 빛이 동시에 존재하게 되면 SOA는 이득포화 상태에 머무르게 되고, 이때 SOA의 굴절률은 입사하는 광 신호의 편광에 거의 무관하게 된다. 이는 본 실험에서 입력 데이터 광 신호의 편광을 조정하여

도 파장변환기의 출력특성에는 영향이 없는 것으로 미루어 볼 때 확인이 된다.

한편 SOA 내에 CW 빛만이 존재하는 조건하에서 CW 빛의 편광을 조정하면 SOA의 편광의존성에 의하여 CW가 얻는 이득이 변화되고, 이는 곧 SOA 굴절률의 변화를 의미한다. 이는 SOA내에서의 XPM의 정도를 나타내며 결과적으로 파장변환기의 출력 특성의 변화를 의미한다. 본 실험에서 편광에 따른 굴절률의 변화는 출력특성을 정반대로 바꾸기에 충분하였다. 이로부터 식(5)를 이용하여 굴절률의 변화 Δn 을 계산하면 약 7.75×10^{-4} 정도가 된다. 이 계산을 위해서는 $\Delta \phi_{SOA} = \pi$, $\lambda = 1550\text{nm}$, $l = 1\text{mm}$ 값을 사용하였다. 앞으로 굴절률의 변화 Δn 을 측정하여 위와 비교해보는 연구도 수행해 보고자 한다.

제안된 구조에서는 SOA의 위치가 변경된다고 하여도 루프입력으로부터 SOA의 좌와 우까지의 상대적인 거리차 Δx 는 항상 유지되어야 한다. 이러한 조건하에서 만약 편광제어기가 SOA의 오른쪽에 위치하게 되면 SOA에 입사되는 시계방향 CW 빛의 순간 편광이 바뀌게 된다. 그러나 편광제어기를 사용하여 SOA에 반시계방향으로 입사되는 CW 빛의 편광을 변화시킬 수 있으므로, SOA의 위치를 변화시키기 전의 출력특성을 다시 얻을 수 있다. 따라서 본 구조에서는 SOA의 위치에 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 다만 이는 루프를 통과하는 빛의 세기가 충분히 약하여 광섬유내에서 비선형성을 일으킬 수 없다는 가정하에서 성립된다.

SOA의 이득회복 시간(유감스럽게도 실험에 사용된 SOA에 대한 관련 수치가 없음)은 SOA를 이용하여 제작되는 여러 시스템의 데이터 속도에 영향을 주게 된다. 그러나 SOA의 성능이 많이 발전되어 현재 이를 이용한 10Gbps 나아가서는 40Gbps 시스템들이 발표되고 있다. 일반적으로 10Gbps 이하에서는 $(\tau + T_r)(C/n) < \Delta x < (T - \tau - T_r)(C/n)$ 을 만족하도록 Δx 를 조절하면 된다. 여기서 τ 는 입력 광펄스 폭을 나타내고, T_r 은 SOA의 이득회복 시간, T 는 입력 광펄스 주기를 나타내며, C 는 광속도, n 은 광섬유의 굴절률을 나타낸다. 그러나 40Gbps의 속도에서는 RZ 패턴 광펄스의 시간폭은 매우 작을 것이다. 예를 들면 25% duty RZ 패턴을 가지는 40Gbps 광펄스를 가정한다면 펄스폭은 6.25ps가 된다. 만약 SOA의 이득회복 시간이 12.5ps이라면 이는 펄스폭의 2배에 해당한다. 이 경우

에 양방향의 CW에 대하여 광펄스 폭에 해당하는 만큼의 시간지연을 고려한다면 Δx 는 1.2mm 정도가 된다. 이렇게 Δx 가 작은 환경에서는 광펄스가 SOA를 지나간 직후 그러나 아직 SOA는 이득이 회복되기 전의 상태에서 반시계방향 CW가 SOA를 통과하게 된다. 따라서 표 1에서 조건 III의 경우는 존재하지 않는다. 반면에 선입력된 CW의 시계방향 CW는 이득이 이미 회복된 SOA를 통과하였으므로 표 1의 조건 I은 계속 존재한다. 이러한 상황에서는 SOA로 입사되는 양방향 CW 빛들의 편광이 같다면 연속된 광펄스 출력들 중에서 뒤의 광 펄스의 출력은 0가 된다. 이는 자동적으로 dummy 데이터 출력이 제거된 것을 의미하며, 따라서 소광비가 증가되는 바람직한 결과를 가져온다. 이렇게 양호한 경우는 $\Delta x = \tau(C/n)$ 이며, SOA의 이득회복 시간 T_r 이 $\tau < T_r < T - 2\tau$ 인 조건을 만족할 때 얻어진다.

IV. 실험 및 결과

제안된 구조에 대한 파장변환 실험 결과를 그림 5에 나타내었다. 실험에서 데이터 신호와 CW의 광원으로는 (주)빛과전자의 모델 AMPAQ DFB-LD들을 사용하였다. 사용된 데이터 신호 광원의 파장은 1554nm이고 CW의 파장은 1550nm이었다. CW의 광원에는 40mA의 전류를 공급하였고, 이때 출력 광파워는 0.6dBm (1.15mW)이었다. 입력 데이터 광 신호의 평균 광파워는 -4.9dBm (0.32mW)이었다. 편광제어기로는 도남시스템의 In-line polarization controller를 사용하였고, 2×2 3dB 광섬유 커플러로는 한국단자(주)의 제품을 사용하였다. 써큘레이터는 Photonic Technology사의 제품을 사용하였다. 가변필터는 Newport 제품을 사용하였으며, 통과대역폭은 약 1nm이다. 실험에서 모든 광소자들은 FC/APC 커넥터를 가지고 있으며, 광소자간의 연결은 어댑터를 사용하였다. 광신호의 스펙트럼 분석을 위해서는 Anrits사의 모델 MS9710B 광스펙트럼분석기를 사용하였다.

본 실험에 사용된 SOA는 상용제품이 아니라 개발완료 단계에서 시험을 위하여 제작된 것이어서 성능이 우수한 편이 아닌 것으로 사료된다. 실험에서 사용된 SOA 공급전류는 130mA였고, 이때의 포화 출력 광파워는 6.8dBm이었다. 동일한 전류하에서 ASE

(Amplified Spontaneous Emission) 파워는 4.47dBm (2.8mW)이었으며, SOA에 시계방향의 CW 빛 만이 입사되었을 때의 이득은 12.7dB이었다.

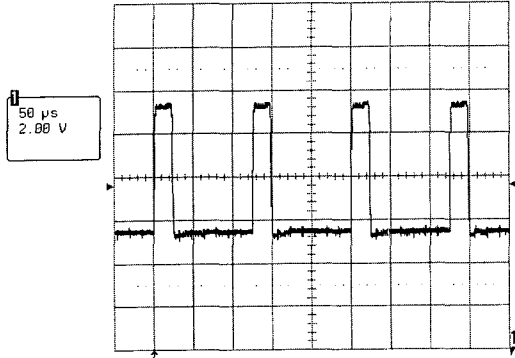


그림 5. (a) 입력 데이터 광신호 파형
Fig. 5. (a) Input data optical signal waveform.

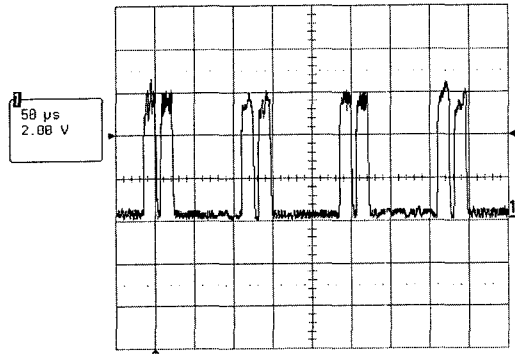


그림 5. (b) Dummy 데이터 파장변환 신호와 원하는 파장변환 신호가 함께 출력된 파형
Fig. 5. (b) Output waveform of dummy wavelength converted data signal and desired wavelength converted data signal.

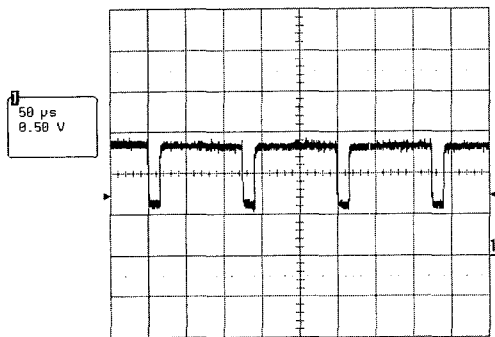


그림 5. (c) 출력단(1)에서 관측된 파장변환 신호 파형
Fig. 5. (c) Output waveform of wavelength converted signal at output stage(1).

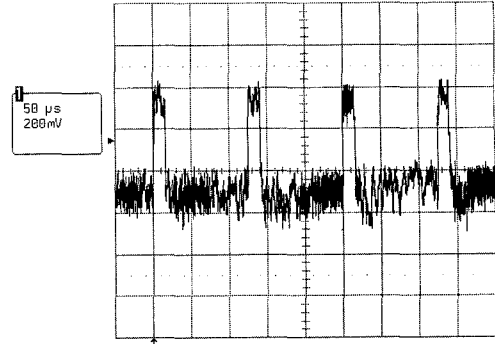


그림 5. (d) 출력단(2)에서 관측된 파장변환 신호 파형
Fig. 5. (d) Output waveform of wavelength converted signal at output stage(2).

그림 5(a)는 입력 RZ 데이터 신호 빛을 광검파기로 검파한 파형을 보여주는데, RZ 데이터 신호의 속도는 8Kbps이며, duty ratio는 약 15%로 하였다. 이에 따라 비대칭길이 Δx 는 약 4.9Km를 사용하였다. 본 구조에서는 RZ 신호의 duty ratio로서 50% 이하가 요구된다.

그림 5(b)는 앞에서 언급하였던 선입력 CW 신호에 의해 생성된 dummy 데이터 출력과 원하는 파장변환된 신호가 함께 출력된 결과를 보여준다. 인접한 두 펄스 간의 시간지연 $25\mu s$ 는 그림 4의 비대칭길이 Δx 에 의한 지연시간과 잘 일치함을 알 수 있다. 그림에서 보여진 dummy 데이터 출력과 파장변환 출력은 그 크기가 같고 또한 소광비 모두 11.4dB로 10dB를 넘는 것을 알 수 있다. 이에 대한 분석은 다음과 같다. 그림 5(b)의 인접된 펄스중에 왼쪽에 있는 펄스를 dummy 데이터 출력이라고 하면 이 출력은 논문의 표 1에 있는 조건 I 과 조건 IV에 해당하는 두 빛의 간섭에 의하여 이루어진다. 한편 오른쪽에 있는 파장변환 출력은 조건 II 와 조건 III에 해당하는 두 빛의 간섭에 의하여 이루어진다. 그런데 조건 II와 조건 IV에서는 SOA의 이득포화 현상으로 인하여 입사되는 빛의 편광에 관계없이 SOA의 굴절률은 거의 일정하게 유지된다. 이는 $\Delta\phi_{SOA,W}$ 와 $\Delta\phi_{SOA,W}$ 가 서로 같음을 의미한다. 조건 I 과 조건 III에서는 양방향 CW 빛들이 겪는 $\Delta\phi_{SOA,W0}$ 와 $\Delta\phi_{SOA,W0}$ 가 같도록 편광제어기를 조정한다. 이로부터 dummy 데이터 출력과 파장변환 출력 각각에 대하여 양방향간의 위상차가 같게 되어 두 출력의 크기는 같게 된다. 이때 소광비가 특히 큰 것은 '0'신호가 전송될 때 $\Delta\phi_{SOA,W0}$ 와 $\Delta\phi_{SOA,W0}$ 가 서로 같으므로 루프미러내에서의 양방향 총 위상차가 π 가

되고 간섭계에서의 visibility가 크므로 출력단에서는 큰 상쇄간섭이 일어난다. 이는 '0'에 해당하는 광파워가 매우 작음을 의미하므로 큰 소광비를 얻을 수 있다.

그림에서 보여진 두 펄스 모두 파장변환된 출력신호들이므로 어느 한쪽을 dummy 데이터로서 제거하고 나머지를 출력신호로 사용할 수 있다. 본 실험에서는 편광제어기의 조정에 의하여 앞쪽 출력 펄스를 제거하였다. 그러나 입력 데이터 신호에 대한 파장변환 출력신호의 시간지연을 최소화하기 위해서는 편광제어기의 조정에 의하여 선출력된 앞쪽 출력 신호는 살리고 대신에 뒤쪽 출력을 제거하는 것이 바람직하다. 그런데 왼쪽 dummy 데이터 출력을 제거하기 위해서는 $\Delta\phi_{SOA,wo}$ 이 SOA의 이득포화로 인하여 편광에 관계없이 고정된 값을 가지는 $\Delta\phi_{SOA,w}$ 와 같은 값을 가지도록 편광제어기를 조정하는 것이다. 이는 식(7)과 같은 조건을 나타내며, 이러한 조건하에서는 파장변환 출력의 크기와 소광비가 감소하게 된다. 이로부터 dummy 데이터를 제거하는 과정에서 파장변환 출력 광신호의 소광비가 심하게 저하되는 것을 알 수 있다.

그림 5(c)는 써큘레이터를 지나 필터의 출력단에서 관측된 파형을 나타낸다. 그림에서 보여진 것처럼 관측된 파형은 입력된 신호에 대해 반전된 형태를 지닌다.

그림 5(d)는 루프미러 출력(2)를 지나 필터의 출력단에서 관측된 비반전된 파장변환 파형을 나타낸다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 제안된 구조는 입력된 데이터 신호에 대해 반전 및 비반전된 파장변환 출력들을 동시에 제공한다. 그림으로부터 파장변환 신호의 소광비(extinction ratio)는 약 4.3dB로 나타났는데, 이는 그림 5(a)에서 보여진 입력 데이터 광신호의 3.2dB 보다는 개선되었지만 실제 시스템 적용면에서는 부족하다. 그러나 본 실험에서 사용된 필터의 통과대역폭이 1nm이므로 이를 통하여 출력되는 SOA의 ASE 파워가 그림 5(d)의 파형에는 포함되어 있다. 따라서 만약에 사용된 필터의 통과대역폭이 파장변환 신호의 스펙트럼만을 통과시킬 정도로 충분히 좁다면 파장변환 신호의 소광비는 조금 더 개선되었을 것이다. 보통 10dB의 소광비는 시스템 성능을 충분히 만족시킬 수 있는 값으로 알려져 있다. 앞으로 소광비를 개선하기 위한 추가 연구가 요구된다.

그림 6 (a)는 그림 4의 루프내의 SOA 오른쪽에서 측정된 입력 데이터 광 신호와 CW의 스펙트럼을 보여준다. 왼쪽은 CW 광원이며 중심파장이 1550nm이고, 오른쪽

쪽은 입력 데이터 광 신호이며 1554nm이다. 일반적으로 데이터 광 신호가 SOA에 입사되면 이는 SOA로부터 이득을 얻어 광파워가 증가되지만 이로 말미암아 CW 빛의 이득은 상대적으로 줄어든다. 그리고 두 광원의 스펙트럼 선폭은 원래 서로 비슷하지만, 실험에서는 입력 데이터 광 신호가 변조되어 있기 때문에 이의 스펙트럼이 더 넓어졌음을 보여준다. 그리고 그림으로부터 SOA에서 나오는 ASE에 의하여 기저선의 스펙트럼이 오른쪽으로 갈수록 조금씩 증가되는 것을 볼 수 있다.

그림 6(b)는 그림 5(d)에서 관측된 파장변환 출력신호에 대한 스펙트럼을 나타낸다. 본 실험에서 사용된 입력 데이터의 파장은 1554nm이고, CW 신호의 파장은 1550nm인 바, 출력된 데이터의 파장이 1550nm이므로 파장변환이 잘 이루어졌음을 보여준다. 그림의 스펙트럼에서 아랫부분이 둥글게 나온 것은 실험에서 사용된 필터의 대역폭이 약 1nm에 해당하므로 ASE중 일부가 필터를 통과해 출력된 것이며, 이는 파장변환 출력신호에 비해 약 33dB 정도 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 본 파장변환기 출력의 OSNR(Optical Signal-to-Noise Ratio)은 33dB이다.

본 실험에서는 입력 데이터 광 신호를 얻기 위하여 DFB-LD를 직접변조하였으며, 이때 측정된 입력 데이터 광 신호의 OSNR은 48dB이었다. 그러나 실제 시스템에서는 약하게 들어온 데이터 광 신호를 먼저 EDFA와 같은 광증폭기를 사용하여 증폭시킨 다음에 이를 파장변환기의 입력 데이터 광 신호로 사용하게 된다. 따라서 광 신호의 파워가 동일하다면 실제 시스템에서의 입력 데이터 광 신호의 OSNR은 본 실험의 경우보다 매우 작아지게 된다(OSNR이 보통 30dB 이하임). 그리고 일반적으로 파장변환기의 출력 광 신호의 OSNR은 입력 데이터 광 신호의 OSNR로부터 크게 영향을 받지 않으며 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 본 파장변환기 출력의 OSNR 33dB는 일반적으로 요구되는 25dB보다 약 8dB 정도 더 크므로 만족할 수 있는 값으로 사료된다. 한편 본 논문에서 측정된 값을 이용하여 잡음 지수를 계산한다 하여도 이는 큰 의미가 없는 값으로 보여진다.

본 실험에 사용된 SOA는 상용화 제품이 아니라 개발실험을 위하여 샘플로 제작된 소자이어서 성능에 제한이 있었다(제작사를 밝히기가 어려움). 그러나 최근 들어 SOA의 성능이 개선되어 10Gbps 이상에서 동작

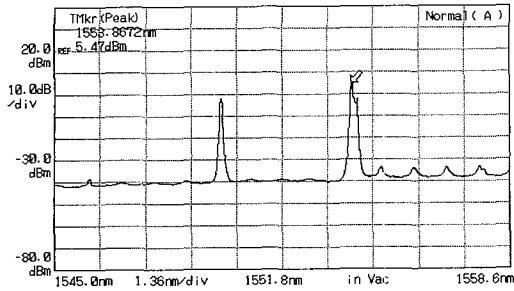


그림 6. (a) SOA의 오른쪽에서 측정된 입력 데이터 광신호와 CW의 스펙트럼

Fig. 6. (a) Wavelength spectrum of input data optical signal and CW measured at the right side of SOA.

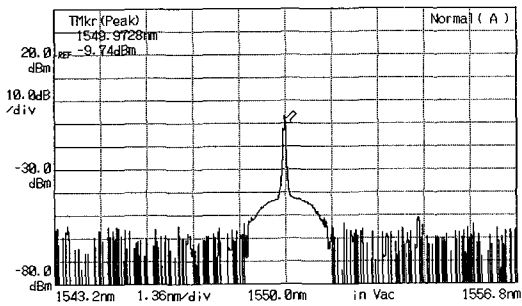


그림 6. (b) 출력된 파장변환 신호의 스펙트럼

Fig. 6. (b) Wavelength spectrum of wavelength converted output signal.

하는 것으로 발표되었다^[9], 본 구조에 이처럼 우수한 성능의 SOA를 적용한다면 10Gbps 이상의 초고속 신호에 대한 파장변환이 가능하리라 사료된다. 입력 데이터 속도가 10Gbps인 경우에 루프입력으로부터 SOA의 좌와 우까지의 거리차인 Δx 는 약 1cm 정도가 요구되며 이는 어려운 기술이 아니기 때문에, 본 구조는 10Gbps 속도에서도 충분히 적용이 가능할 것이다. 각 소자에 부착되어 있는 pigtail의 길이를 줄여서 광섬유 루프의 길이를 최소화하고 PM(Polarization Maintaining) 광섬유를 사용한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

또한 최근에 10Gbps 이상의 속도 특히 40Gbps에서는 NRZ (Nonreturn-to-Zero) 형태보다 RZ 형태의 데이터가 전송성능면에서 더 우수한 것으로 알려짐에 따라 본 논문에서 제안된 RZ 데이터에 대한 파장변환기 구조는 앞으로 더욱 적용가능성이 높다고 볼 수 있다.

본 논문에서 제안된 구조는 RZ 형태의 입력 데이터를 파장변환함에 있어 단지 한 개의 SOA만을 필요로

하므로 다른 구조에 비하여 고가인 SOA 소자 수를 반으로 줄일 수 있으며, 보다 저가인 편광의존형 SOA를 요구하므로 비용 면에서 장점이 있다. 그리고 광섬유 루프미러 구조를 이용한 간섭계를 사용하므로 마이켈슨이나 마하젠더 구조의 간섭계에서 요구되는 팔 길이 제어의 어려움을 쉽게 극복할 수 있어 제작이 매우 용이하다. 또한, 입력 데이터 신호에 대하여 반전 및 비반전 패턴을 가지는 파장변환 신호를 양 출력단에서 동시에 얻을 수 있다. 이로부터 제안된 구조가 기존의 XPM을 이용한 구조들에 비해 비용 및 공정, 그리고 활용 면에 있어서 많은 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

10Gbps 이상의 초고속 전송에서는 전송성능면에서 RZ 형태가 NRZ 형태보다 우수하다고 알려져 있다. 본 논문에서는 광섬유 루프미러내에서 편광제어기를 사용하여 SOA에서의 XPM을 조절할 수 있는 RZ 데이터용 파장변환기를 제안하였으며, 이의 동작을 실험을 통하여 확인하였다. 제안된 방법은 마하젠더나 마이켈슨 간섭계를 이용하는 기존의 XPM 구조에 비하여 고가인 SOA를 한 개만 필요로 하면서도 보다 저가인 편광의존형 SOA를 요구한다. 그리고 루프미러 구조의 적용으로 인하여 간섭계의 제작이 용이하며, 입력 데이터에 대하여 반전 및 비반전된 파장변환 출력신호를 두 개의 출력에서 동시에 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있다.

참 고 문 헌

- [1] E. Iannone and R. Sabella, "Performance Evaluation of an Optical Multi-Carrier Network Using Wavelength Converters Based on FWM in Semiconductor Optical Amplifiers," J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 2, pp. 312-324, Feb. 1995.
- [2] D. Nasset, T. Kelly, and D. Marcenac, "All-Optical Wavelength Conversion using SOA Nonlinearities," IEEE Commun. Magazine, Vol. 36, No. 12, pp. 56-61, Dec. 1998.
- [3] K. Obermann, D. Breuer, and K. Petermann, "Performance Analysis of Wavelength Converters Based on Cross-Gain Modulation in

- Semiconductor-Optical Amplifiers," J. Lightwave Technol., Vol. 16, No. 1, pp. 78-85, Jan. 1998.
- [4] W. Shieh, E. Park, and A. E. Willner, "All-Optical Wavelength Shifting of Microwave Subcarriers by Using Four-Wave Mixing in a Semiconductor Optical Amplifier," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 8, No. 4, pp. 524-526, Apr. 1996.
- [5] S. Diez, C. Schmidt, R. Ludwig, H. G. Weber, K. Obermann, S. Kindt, I. Koltchanov, and K. Petermann, "Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifiers for Frequency Conversion and Fast Optical Switching," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol. 3, No. 5, pp. 1131-1145, Oct. 1997.
- [6] Y. Kim, H. Lee, S. Kim, J. Ko, and J. Jeong, "Analysis of Frequency Chirping and Extinction Ratio of Optical Phase Conjugate Signals by Four-Wave Mixing in SOA's," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol. 5, No. 3, pp. 873-879, May/June 1999.
- [7] A. Kloch, P. B. Hansen, D. Wolfson, T. Fjelde, and K. Stubkjaer, "Wavelength Converters," IEICE Trans. Electron., Vol. E82-C, pp. 1475-1486, 1999.
- [8] 정호진, "Sagnac 루프 반사경을 이용한 광섬유 레이저 자이로스코우프에서 모드로킹된 펄스의 편광 가역성 연구," KAIST 박사학위논문, 1996
- [9] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjaer, "All-Optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers," J. Lightwave Technol., Vol. 14, No. 6, pp. 942-954, June 1996.

저 자 소 개



李承祐(正會員)
1992년 2월 : 강원대학교 물리학과 졸업(이학사). 1997년 8월 : 강원대학교 대학원 물리학과(이학석사). 2000년 2월~현재 : 강원대학교 대학원 전자공학과 박사과정. <관심분야> 광통신, 광교환, 광소자



李正烈(正會員)
1996년 2월 : 강원대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 : 강원대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1999년 2월~현재 : 강원대학교 대학원 전자공학과 박사과정. <관심분야> 광통신, 광교환, 광소자



尹慶毛(正會員)
1994년 2월 : 강원대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1996년 2월 : 강원대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1996년~1998년 : 한국통신 교환기술연구소 광교환 연구팀 전임 연구원 1998년~현재 : 한국통신

가입자망연구소 전광통신망 연구실 전임연구원. <관심분야> 광 네트워크 기술, 초장거리 DWDM 광통신 기술, 광교환 기술



李慵基(正會員)
1981년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1985년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1996년 2월 : 일본 동북대학 공과대학 공학연구과(공학박사). 1985~현재 : 한국통신 가입자

망연구소 전광통신망 연구실 실장. <관심분야> 파장분할 광통신 및 디바이스 기술, 광 테스트 베드 구축기술, 광 인터넷 기술



嚴震燮(正會員)
1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사). 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1990년 12월 : 미국 Texas A&M University 전기공학과(공학박사). 1985년~1987년 : 한국통신 전임연

구원. 1991년~1992년 : 한국통신 선임연구원. 1992년~현재 : 강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수. <관심분야> 광통신, 광교환, 광소자