

論文98-35D-8-10

반도체 광 증폭기내에서의 4광파 혼합을 이용한 2.5 Gb/s 광신호의 전광 파장변환

(All-Optical Wavelength Conversion of 2.5 Gb/s Optical Signals by Four-Wave Mixing in a Semiconductor Optical Amplifier)

房俊鶴*, 徐完錫*, 李聖恩*

(Joon-Hak Bang, Wanseok Seo, and Sung-Un Lee)

요 약

반도체 광 증폭기내에서의 4광파 혼합을 이용하여 2.5 Gb/s 광신호의 파장변환을 수행하였다. 파장변환기에서의 성능의 척도가 되는 변환효율, 광신호대잡음비 및 소광비에 대한 입력 펌프 및 신호광 세기의 영향을 조사하였으며, 그 결과 높은 변환효율 (신호광의 세기가 최소인 경우), 높은 광신호대잡음비 (신호광의 세기가 최대인 경우) 및 낮은 상호이득포화 효과 (신호광의 세기가 펌프광의 세기보다 적어도 6 dB 낮은 경우) 사이에서의 절충에 의해 최대의 비트에러율 성능을 보였다. 본 실험의 경우에는 펌프광은 +3 dBm, 신호광은 -6 dBm의 세기일 때 최적의 성능을 보이는 상태를 얻었다. 따라서, 파장변환 시 발생하는 파워 패널티는 입력 펌프 및 신호광의 세기를 적절히 잘 조정해 줌으로써 최소화 될 수 있다. 본 논문에서는 3.2 nm 파장변환 시 10-10 비트에러율에서 약 0.5 dB의 파워 패널티를 얻었다.

Abstract

We demonstrate wavelength conversion of 2.5 Gb/s optical signals by four-wave mixing (FWM) in a semiconductor optical amplifier (SOA). We investigate the effect of input pump and signal powers on the conversion efficiency, optical signal-to-noise ratio (OSNR) and extinction ratio to be a measure of performance in a wavelength converter. As a result, we show that the maximum bit error rate (BER) performance can be obtained by compromising among high-conversion efficiency (minimum Pprobe), high-OSNR (maximum Pprobe) and low-cross-gain saturation effects (Pprobe kept at least 6 dB weaker than Ppump). In our experiment, we obtain optimum performance at +3 dBm pump power and -6 dBm signal power. The power penalty incurred in the wavelength conversion can be minimized by careful selection of the input pump and signal powers. We show that about 0.5 dB power penalty for 3.2 nm wavelength conversion at 10-10 BER is achievable.

I. 서 론

최근 국내외적으로 정보량의 급증에 따라 전송시스

템의 대용량화가 진행되고 있다. 특히 여러 채널의 광 파장을 사용함으로써 광섬유가 제공하는 넓은 대역폭을 효과적으로 이용할 수 있는 파장분할다중방식(wavelength division multiplexing: WDM)에 의한 전송방식이 높은 관심을 끌고 있다. 이러한 WDM 전송장치를 이용하는 통신망에서 광증폭기와 더불어 핵심요소가 되는 것이 파장변환기이다. 파장변환기는 전송속도 및 전송방식에 무관하게 전송신호의 파장을 변

* 正會員, 韓國電子通信研究院 廣帶域傳送硏究部
(Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) Transmission Technology Department)
接受日字:1998年3月21日, 수정완료일:1998年6月11日

환하는 장치로서, WDM 통신망 내에서의 파장 충돌 (contention)(동일한 파장의 두 채널이 같은 경로를 지나게 되는 경우)에 의한 블로킹(blocking)을 줄일 수 있는 것과 유용한 파장을 재사용함으로써 고정된 파장들에 대한 망의 유연성(flexibility) 및 용량(capacity)을 증가시키는 역할을 수행할 수 있다^[1-2]. 또한 망을 분산시켜서 관리할 수 있도록 해주며, 보호 절체(Protection Switching)를 보다 쉽게 할 수 있도록 하는 것도 파장변환기의 중요한 역할이다^[3]. 파장 변환 방식에는 여러 가지가 있는데, 크게 세 가지의 범주로 나눌 수 있다. 첫번째는 가장 단순한 방법으로 광/전-전/광(O/E-E/O) 변환을 통하여 파장변환을 하는 Optoelectronic Wavelength Conversion^[4], 두 번째는 반도체 광 증폭기내에서의 상호이득변조(cross gain modulation: XGM) 및 상호위상변조(cross phase modulation: XPM)를 이용하여 파장변환을 하는 Optical Gating Wavelength Conversion^[5-7], 그리고 세번째는 광파혼합(wave-mixing)을 통하여 새로운 파장의 광신호를 생성하여 파장변환을 하는 Wave-Mixing Wavelength Conversion이다^[8-10]. 첫번째 및 두번째 방식의 파장변환기의 경우 좋은 성능을 보이고는 있으나, 비트율 또는 변조형태에 따라 완전한 정보의 투명성(transparency)을 보장하지 못하는 단점이 있으며, 세번째의 광파혼합을 이용한 파장변환의 경우 완전한 투명성은 제공해 줄 수 있지만 구현하는 데 있어서 가장 큰 문제점으로 변환효율이 낮다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 파장변환기를 구현하는데 있어서 반도체 광 증폭기내의 대표적인 비선형 현상 중 하나인 4광파 혼합(four-wave mixing: FWM)을 이용하여 2.5 Gb/s 광신호의 파장변환 실험을 수행하였다. 우선 SOA의 입력 신호인 펄스 및 신호광의 세기에 따른 파장변환 특성인 변환효율(conversion efficiency), 광신호대잡음비(optical signal-to-noise ratio: OSNR) 및 소광비(extinction ratio) 변화를 조사하였다. 그리고 최종 파장변환기의 성능이 되는 파워 패널티(power penalty)의 변화를 조사하여, 최적의 파장변환이 일어나는 실험 조건을 도출하였다.

II. 동작원리 및 특성

비선형 광물질 내에서 광파들간의 비선형적인 상호

작용으로 형성되는 비선형 광파혼합 방식은 진폭 및 위상정보에 대해 모두 민감하며, 완전한 정보의 투명성을 제공하는 파장변환 방법의 유일한 범주에 속한다. 지금까지 3차 비선형성에 바탕을 둔 4광파 혼합과 2차 비선형성에 바탕을 둔 DFG(difference-frequency-generation)가 그 예로써 설명되어져 왔다. 그림 1은 광파혼합 파장변환기에 대한 기능블럭도를 나타낸 것이다.

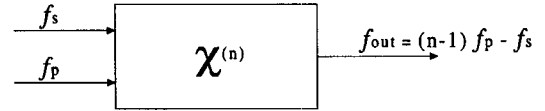


그림 1. 광파혼합 파장변환기의 기능블럭도

Fig. 1. The block diagram of wave-mixing wavelength converters.

4광파 혼합에 의한 파장변환은 입력 신호광(f_s)과 펄스광(f_p)의 혼합이 파장변환된 신호($2f_p - f_s$)를 생성하는 3차 비선형 효과에 의한 것이다. 물리적인 관점에서 보면, 이 과정은 어떤 비선형 매질에 하나 이상의 광파가 존재할 때 그 매질의 비선형적인 광 응답에 있다. 즉, 펄스광과 신호광의 비팅(beat)에 의해 비선형 매질내에 격자(grating)가 생성되고 펄스광이 이 격자로부터 산란(scattering)이 되어 새로운 광파가 생성된다는 것이다. 이때, 새로이 생성된 광파는 매질에 존재하는 광파들간의 상호작용으로 그 광파들의 강도의 곱에 비례하는 강도와 그 광파들의 위상 및 주파수의 선형 결합(linear combination)으로 생기는 위상 및 주파수를 가지게 된다. 따라서, 4광파 혼합은 위상 및 진폭정보를 모두 가지고 있으며, 변조형태에 상관없이 완전한 정보의 투명성을 제공하게 되는 것이다. 또한, 이러한 파장변환 방식의 유일한 특징은 여러 개의 입력 파장들이 동시에 여러 개의 출력 파장으로 파장변환 될 수 있다는 것이다^[11]. 즉, optical field에서 중첩의 원리가 성립되는 특징을 가지고 있다. 그리고, 이 방식은 잠재적으로 100 Gb/s 이상의 극히 높은 비트율의 신호들까지도 수용할 수 있으며 입력력 파장의 연속적인 튜닝이 가능한 장점도 지니고 있다.

III. 실험 구성

반도체 광 증폭기(semiconductor optical amplifier: SOA)내에서의 4광파 혼합을 이용한 전광 파

장변환 실험 장치의 구성도는 그림 2와 같다.

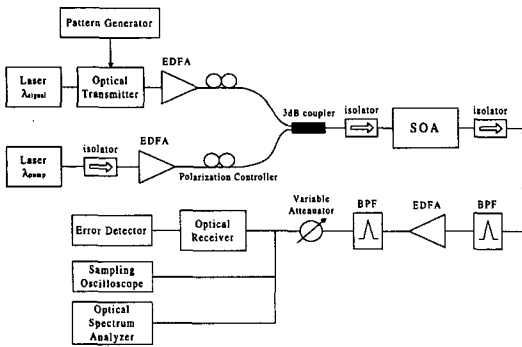


그림 2. SOA내에서의 FWM을 이용한 파장변환 실험 구성도

Fig. 2. Experimental set-up for wavelength conversion by FWM in a SOA.

신호광은 패턴 발생기에서 생성되는 2.5 Gb/s 신호로 광 송신기에서 강도 변조되었으며, 펌프광은 파장가변 레이저를 사용하여 튜닝하면서 변환될 빛의 파장을 임의로 조절할 수 있도록 하였다. SOA내에서 4광파 혼합이 발생하도록 하기 위해 신호 및 펌프광의 세기를 광증폭기(erbium doped fiber amplifier: EDFA)로 충분히 증폭을 한 후, 신호 및 펌프광 각각에 대해 편광 조절기를 두어 SOA에 입력되는 편광을 이득이 최대가 되도록 조정하였다. 두 빛은 3 dB 광 커플러(coupler)를 통해 SOA에 동시에 입력되며, 실험에서 사용한 SOA에서 반사로 인해 발진하는 것을 막기 위해 SOA의 입출력단에 광 아이솔레이터(isolator)를 두었다. 사용한 SOA는 입력광 세기가 20 dBm일 때 약 22 dB의 fiber-to-fiber 이득을 가지고, 약 0.7 dB의 비교적 낮은 편광의존성을 가지며, 4광파 혼합이 비교적 잘 일어나는 cavity length가 긴 Alcatel 사의 1901 SOA를 사용하였다. SOA에 공급되는 바이어스 전류는 사용한 SOA의 비선형성이나 이득포화특성이 유지되는 범위내에서 최대 이득을 얻기 위한 최대 전류인 200 mA로 하였고, 동작 온도도 20C가 유지될 수 있도록 온도제어를 해주었다. SOA 출력단에는 신호광, 펌프광 및 파장변환된 빛이 모두 나오므로 광 스펙트럼 분석기를 보면서 필터로 파장변환된 신호만을 통과시켜야 하는데, 인접한 펌프광의 세기가 매우 강하며 채널간격이 1.6 nm로 근접되어 있어서 대역폭이 매우 좁은 필터가 요구되어 본 실험에서는 대역폭이 0.3 nm인 필터와 1.3 nm인 필

터를 직렬로 연결해서 사용하였다. 파장변환된 신호의 세기가 매우 약하므로 이를 EDFA로 증폭시킨 후 샘플링 오실로스코프(sampling oscilloscope)로 아이 패턴(eye pattern)을 조사하고 광 수신기로 검출한 다음 에러 검출기로 에러율을 측정하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

파장변환 실험에서 사용한 신호 및 펌프광의 파장은 각각 1555.9 nm와 1554.3 nm이며, 따라서 파장변환된 신호는 1552.7 nm로 3.2 nm의 파장변환 영역을 가지게 된다. 신호광은 2.5 Gb/s의 $2^{23}-1$ PRBS로 강도 변조된 신호이며 펌프광의 파장은 향후 파장변환기가 적용될 광상호분배기(optical cross-connect: OXC)에서 사용하고 있는 파장영역(1.6 nm의 채널간격)으로 하였다.

SOA에 입력되는 신호 및 펌프광의 적정 세기를 구하기 위해서 파장변환기에서의 성능의 척도가 되는 변환효율, 광신호대잡음비 및 소광비에 대한 입력 펌프 및 신호광 세기의 영향을 조사하였다. 변환효율은 파장변환된 출력 신호광 세기와 입력 신호광 세기의 비로 정의되며 파장변환기의 이득을 의미하는 것으로, 입력 신호 및 펌프광의 세기에 따른 변환효율의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 보듯이 입력 신호광의 세기가 적을수록 변환효율은 크게 되며, 최대 변환효율은 신호광의 세기는 최소, 펌프광의 세기는 약 7 dBm인 경우에 얻을 수 있다. 이것은 SOA가 포화되지 않는, 최대의 이득을 갖는 상태에서 얻어지게 된다. 그러나, 파장변환효율이 최대라고 해서 파장변환기에 대한 최적의 상태가 될 수는 없다. 변환효율은 최대가 되지만 파장변환된 출력 신호광의 세기가 비교적 약한 것에 반해 높은 이득에 의한 ASE (amplified spontaneous emission) 잡음이 크게 되어 신호대잡음비가 나빠지게 되고, 그로 인한 비트에러율이 저하되기 때문이다. 광신호대잡음비는 파장변환된 출력 신호광 세기와 ASE 잡음레벨의 비로서, 입력 신호 및 펌프광의 세기에 따른 광신호대잡음비의 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보듯이 입력 신호광의 세기가 클수록 광신호대잡음비는 크게 되고, 최대 광신호대잡음비는 신호 및 펌프광의 세기가 최대인 경우에 얻을 수 있으며, 최대 26 dB까지 관측되었다. 이것은 입력 신호 및 펌프광의 세기가 클수록 파

장변환된 출력 신호광의 세기는 커지는 반면 ASE 잡음은 SOA의 이득포화 특성에 의해 적어지기 때문이다. 파장변환기에서의 성능의 척도가 되는 또 한가지 요소인 소광비는 강도변조된 광신호의 1 비트 파워와 0 비트 파워의 비로 정의되며 1 비트와 0 비트의 구분정도를 의미하는 것으로, 주어진 펌프광에 대한 최대 소광비를 보이는 입력 신호광의 세기를 조사하였으며, 이것을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보듯이 높은 소광비는 신호광의 세기를 펌프광의 세기보다 약 6 dB 적게 할 경우에 얻을 수 있다. 이는 높은 소광비를 얻기 위해서는 상호이득포화 효과가 발생하지 않도록 해야 하기 때문이다. 따라서, 파장변환기는 성능의 척도가 되는 세가지 요소인 변환효율, 광신호대잡음비 및 소광비들 사이에서의 적절한 절충에 의해 최적의 성능을 가지게 된다. 최적의 성능을 보이는 입력 신호 및 펌프광의 세기를 구하기 위해 입력 신호 및 펌프광의 세기에 따른 최종 파장변환기의 성능이 되는 파워 패널티의 변화를 조사하였으며, 이를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보듯이 신호광은 -6 dBm, 펌프광은 +3 dBm의 세기일 때 파워 패널티가 0.4 dB로 가장 적었으며 이때 최적의 아이 패턴을 얻을 수 있었다. 신호광의 세기가 적을수록 패널티가 커지는 것은 파장변환된 신호광의 세기가 약한 것에 반해 높은 이득에 의한 ASE 잡음이 크게 되어 신호대잡음비가 나빠지기 때문이며, 신호광의 세기가 클수록 패널티가 커지는 것은 SOA의 이득포화 특성에 의해 변환효율 및 소광비가 저하되기 때문이다.

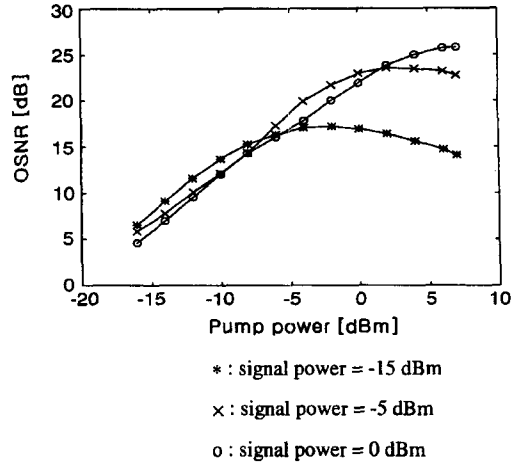


그림 4. 펌프 및 신호광 세기에 대한 광신호대잡음비의 변화
Fig. 4. OSNR variation for pump and signal powers.

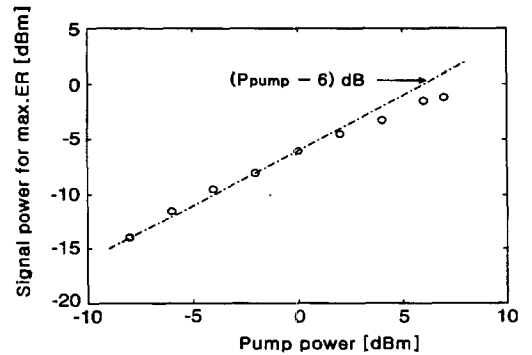


그림 5. 최대 소광비를 보이는 신호광의 세기
Fig. 5. Signal power for obtaining maximum extinction ratio at any given pump power.

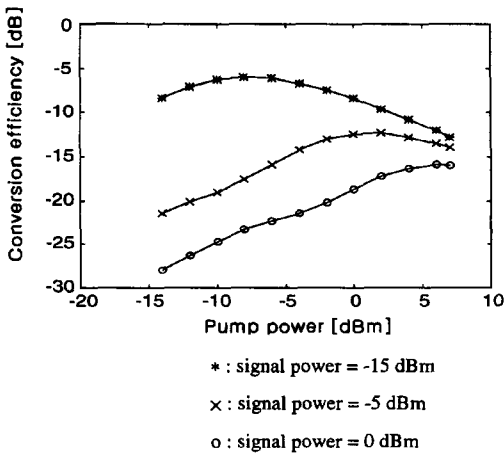


그림 3. 펌프 및 신호광 세기에 대한 변환효율의 변화
Fig. 3. Conversion efficiency variation for pump and signal powers.

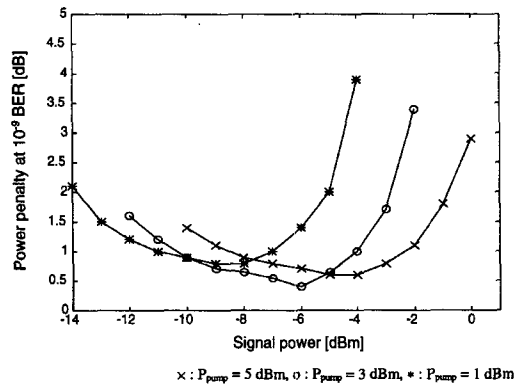


그림 6. 펌프 및 신호광 세기에 대한 파워 패널티의 변화
Fig. 6. Power penalty variation for pump and signal powers.

위에서 구한 입력 조건하에서 파장변환 실험 결과로 측정된 광 신호들의 스펙트럼, 아이 패턴 및 에러율 곡선을 그림 7, 8, 9에 각각 나타내었다. 그림 7은 SOA의 4광파 혼합 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로 4광파 혼합으로 생성된 파장변환된 신호의 OSNR이 약 24 dB 정도가 됨을 알 수 있다. 그림 8의 (a)는 2.5 Gb/s로 변조된 입력 신호의 아이 패턴을 나타낸 것이고, (b)는 파장변환된 신호의 아이 패턴을 나타낸 것으로, 입력 신호의 소광비는 약 12 dB이고 파장변환된 신호의 소광비는 약 11.5 dB 였으며, 이득포화 효과가 발생하지 않도록 함으로써 소광비의 저하가 거의 없음을 알 수 있다. (c)는 입력 신호광의 세기를 강하게 하여 이득포화 효과에 의해 아이 패턴에 왜곡이 생긴 것을 보여주는 그림이며, (d)는 입력 신호광을 더욱 강하게 하여 완전히 찌그러진 모습을 보여주는 것으로 이득포화 효과에 의해 소광비가 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 그림 9의 에러율 곡선에서 빈 원 (o)은 광 송신기에서 강도 변조된 신호를 back-to-back으로 측정한 에러율이며, 가위표시(x)는 최종 파장변환된 출력 신호의 에러율이다. 그림에서 보듯이 3.2 nm의 파장변환 영역을 가지는 2.5 Gb/s 광신호의 파장변환 실험에서 최종 파장변환된 출력 신호의 입력 신호에 대한 파워 페널티는 10^{-10} 에러율에서 약 0.5 dB가 됨을 알 수 있다.

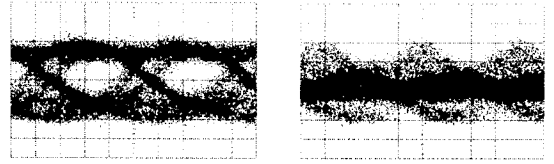
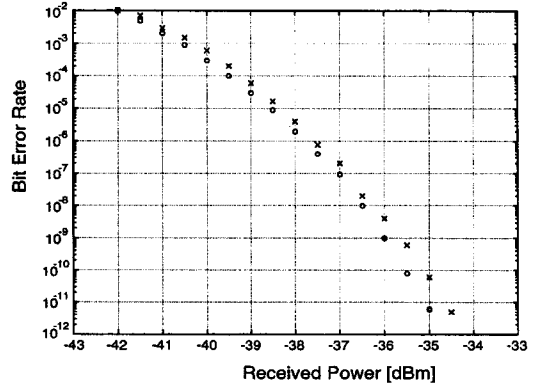


그림 8. 아이 패턴 (a) 2.5 Gb/s로 변조된 입력신호, (b) 파장변환된 출력신호, (c) 강한 입력신호에 의해 이득포화된 출력신호, (d) 더욱 강한 입력신호에 의해 완전히 찌그러진 출력신호

Fig. 8. Measured eye patterns. (a) 2.5 Gb/s modulated input signal, (b) wavelength converted output signal, (c) gain saturated output signal with a strong input signal, (d) completely distorted output signal with a stronger input signal.



o : back-to-back으로 측정한 BER
x : 파장변환된 출력 신호의 BER

그림 9. 측정된 비트에러율 곡선
Fig. 9. Measured BER curves.

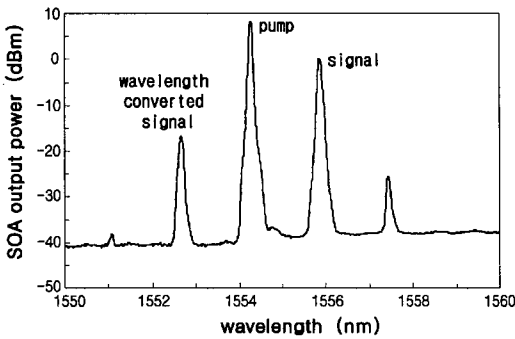
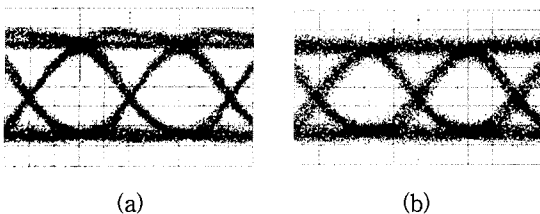


그림 7. SOA의 4광파 혼합 출력 스펙트럼
Fig. 7. FWM spectrum of SOA output.



(a) (b)

V. 결론

반도체 광 증폭기 내에서 4광파 혼합을 이용하여 2.5 Gb/s 광신호에 대한 3.2 nm의 변환영역을 가지는 파장변환을 수행하였다. 4광파 혼합을 이용한 파장변환 방식은 극히 높은 비트율에 대한 파장변환이 가능하고, 변조형태에 상관없이 완전한 정보의 투명성을 제공하며, 증폭기의 이득 대역폭 내에서 입출력 파장의 연속적인 튜닝이 가능하다. 또한, 이러한 방식의 유일한 특징은 여러 개의 입력 파장들이 동시에 여러 개의 출력 파장으로 변환될 수 있다는 것이다. 파장변환기에서의 성능의 척도가 되는 변환효율, 광신호대잡음비 및 소광비에 대한 입력 펄스 및 신호광 세기의 영

향을 조사하였다. 최적의 성능을 보이기 위한 높은 변환효율, 높은 광신호대잡음비 및 낮은 상호이득포화 효과 사이에서의 절충에 의해 펌프광은 +3 dBm, 신호광은 -6 dBm의 세기일 때, 3.2 nm 파장변환된 신호의 소광비는 11.5 dB, 광신호대잡음비는 24 dB를 얻었으며, 파장변환 전의 신호에 대하여 10^{-10} 비트 에러율에서 약 0.5 dB의 파워 페널티를 얻었다.

감사의 글

※ 본 연구는 정보통신부 출연의 초고속 광대역 광전달망 기술연구 과제로 수행되었으며, 본 연구 수행에 많은 도움을 주신 김재근 박사, 박창수 박사, 한정희 박사께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Okamoto and K. Sato, Optical Path Cross-connect Systems for Photonic Transport Networks, in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.*, pp. 474-480, Nov. 1993.
- [2] C. A. Brackett, A. S. Acampora, J. Schweitzer, G. Tangonau, M. T. Smith, W. Lennon, K. C. Wang, R. H. Hobbs, A Scalable Multiwavelength Multihop Optical Network: A Proposal for Research on All-optical Networks. *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 736-752, May/June. 1993.
- [3] K. Sato, S. Okamoto, and H. Hadama, Network Performance and Integrity Enhancement with Optical Path Layer Technologies, *J. Select. Areas Commun.*, vol.12, pp. 159-170, Jan. 1994.
- [4] M. Kovacevic and A. S. Acampora, Electronic Wavelength Translation in Optical Networks, *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1161-1169, Jun. 1996.
- [5] 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, Jun. 1996.
- [6] J. M. Wiesenfeld, B. Glance, J. S. Perino, and A. H. Gnauck, Wavelength Conversion at 10 Gb/s using a Semiconductor Optical Amplifier, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1300-1303, Nov. 1993.
- [7] T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen, R. J. S. Pedersen, and K. E. Stubkjaer, All Optical Wavelength Conversion by SOAs in a Mach-Zehnder Configuration, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 1, pp. 53-55, Jan. 1994.
- [8] M. C. Tatham, G. Sherlock, and L. D. Westbrook, 20-nm Optical Wavelength Conversion Using Nondegenerate Four-Wave Mixing, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1303-1306, Nov. 1993.
- [9] David F. Geraghty et al., Wavelength Conversion up to 18 nm at 10 Gb/s by Four-Wave Mixing in a Semiconductor Optical Amplifier, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 452-454, Apr. 1997.
- [10] M. A. Summerfield and R. S. Tucker, Optimization of Pump and Signal Powers for Wavelength Converters Based on FWM in Semiconductor Optical Amplifiers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 1316-1318, Oct. 1996.
- [11] K. Inoue, T. Hasegawa, K. Oda and H. Toba, Multichannel Frequency Conversion Experiment Using Fiber Four-Wave Mixing, *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 19, pp. 1708-1710, Sep. 1993.

저 자 소 개



房俊鶴(正會員)

1971년 11월 21일생. 1994년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1996년 3월 ~ 현재 한국전자통신연구원 연구원. 주관심분야는 광전달망, 광통신 등

徐完錫(正會員)

1958년 1월 5일생. 1980년 2월 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년 1월 ~ 1983년 3월 국방과학연구소 연구원. 1983년 3월 ~ 현재 한국전자통신연구원 선임연구원. 주관심분야는 광통신, 광전달망, 광센서 등임



李聖恩(正會員)

1956년 1월 27일생. 1978년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1992년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1980년 9월 ~ 현재 한국전자통신연구원 근무. 주관심분야는 광대역 광전달망 및 광회선 분배기 등임