

반도체 광증폭기의 상호 이득 변조를 이용한 2.5 Gbps 다채널 가변형 파장변환기

손정민[†] · 이상선

한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 통신연구실
Ⓣ 133-791, 서울특별시 성동구 행당동 17번지

(2005년 4월 15일 받음, 2005년 6월 16일 수정본 받음)

본 논문에서는 파장 분할 다중화 방식 광통신에의 적용을 목적으로 하는 다채널 가변형 파장 변환기(Wavelength Converter)를 구성하여 이의 성능을 분석하였다. 파장 변환기는 반도체 광증폭기(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)의 상호 이득 변조(XGM : Cross Gain Modulation) 특성을 이용한 파장 변환 방식이 이용되었다. 2.5 Gbps 광통신 기반 100 GHz의 채널 간격을 갖는 다채널 신호들에 대한 파장 변환 성능을 측정, 분석하였다.

본 파장 변환기의 상호 이득 변조 성능을 측정된 결과, 소광비(Extinction Ratio)와 비트 오류율(BER : Bit Error Rate) 등의 검증에서 2.5 Gbps 기반의 파장 분할 다중화 방식 광통신에 사용하기에 충분한 성능을 보였으며, 이를 통해 최근 개발된 상호 위상 변조 방식(XPM : Cross Phase Modulation)의 다채널 파장 변환기와 비교해 상대적으로 간단한 구조를 가지고 제작 및 변조 효율에 우위를 보이는 파장 변환기로서 대체될 수 있음을 밝힌다.

주제어 : WDM, Wavelength converter, SOA.

I. 서 론

현재 광전송로의 대용량화를 위해 사용되고 있는 일반적인 통신 방식은 시간 분할 다중화(TDM : Time Division Multiplexing) 방식과 파장 분할 다중화(WDM : Wavelength Division Multiplexing) 방식으로 양분되고 있으며, WDM 시스템은 광섬유의 대역폭을 매우 효율적으로 사용할 수 있도록 해주며, 파장 라우팅에 기반을 둔 유연한 상호접속을 제공하는 장점을 가지고 있다. 최근에는 WDM 방식의 기술 발전으로 광전송 시스템의 대용량화가 급속도로 이루어지고 있는 추세이다.^[1]

한편, 대용량 광통신 기술을 실현 가능하게 하기 위해서는 이에 적합한 성능과 특성을 가진 광소자 기반 기술이 반드시 뒷받침되어야 하며, 특히 이러한 대용량의 동적 WDM 시스템을 구현하기 위해서는 파장 재사용을 통한 시스템 용량 증대가 필수적이다. 이에 따라 파장 정체를 해소하여 네트워크의 용량을 증가시키고 보다 유연한 WDM 네트워크를 구현하기 위하여 파장 변환기(Wavelength Converter)가 제안되었으며, 이의 실제 구현을 위해 SOA를 이용한 4 파장 혼합(FWM - Four Wave Mixing),^[2] 반도체 레이저(Laser),^[3] SOA를 이용한 XGM, XPM^[4,5] 등의 방법들이 현재까지 연구되어 왔다.^[6-8]

파장 변환의 기능을 위해서 최근에는 C-band(Conventional-band) 36 nm 파장 대역 폭에서 파장 간 간격을 25 GHz로 파장 가변되는 반도체 레이저도 상용품으로 출시되고 있지만, SOA를 이용한 파장 가변을 연구하는 이유에는 광 네트

워크에서의 완전 광학적(All Optical) 기능을 구현하자는 근본적인 취지가 배경 이유이다.

따라서, 본 논문에서는 XPM 방식의 파장 변환기에 비해 비교적 간단한 구조를 가지고 있어 기능 구현의 간단함과 파장 변환 효율이 우수한 장점을 가지고 있는 XGM 방식 Single-SOA 파장 변환기를 구성하고, 이 파장 변환기에서 2.5 Gbps NRZ(None Return to Zero) 광신호에 의해서 상호 이득 변조된 WDM 다채널 신호들의 소광비 및 비트 오류율을 측정하여 그 성능을 보였다.

II. SOA의 개념

반도체 광 증폭기로 불리는 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)는 가전자 대역의 정공과 전류주입에 의한 전도 대역의 자유전자가 입력 광신호의 자극에 의해 재결합하면서 유도 방출됨을 이용해 입력 신호를 증폭하는 원리로 동작하는 반도체 소자이며 그림 1-(a), (b)와 같이 패브리-페롯(FPA : Fabry Perot Amplifier) 형태와 진행파(TWA : Traveling Wave Amplifier) 형태로 분류될 수 있다. FPA 형태는 일반적인 레이저 다이오드(LD : Laser Diode)를 자체 발진이 일어날 수 있는 인가전류 미만으로 동작시킨 것으로, 이 경우 증폭률이 작고 삽입손실이 크다. 또한 결정된 공진조건에 맞는 파장과 맞지 않는 파장 간에 증폭률이 상호 다른 단점을 가지고 있다. TWA 형태는 일반적인 레이저 다이오드에 잔류 반사율을 줄이는 다양한 기법을 사용하여 제작하는데, 잔류반사율이 높은 경우 FPA가 보이는 여러 가지 단점들이 나타날 수 있기 때문에 제조 공정상 잔류반사율을 줄이기 위한 많은 노력이 필요하다. 실제 잔류 반사에 의한 효과를 무시

[†]E-mail: ssnlee@hanyang.ac.kr

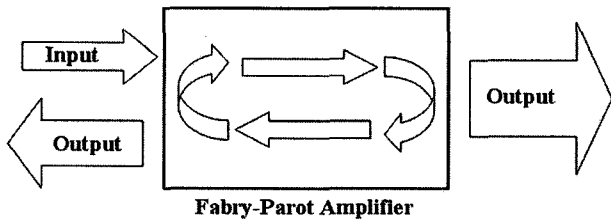


그림 1-(a). FPA 형태의 SOA.

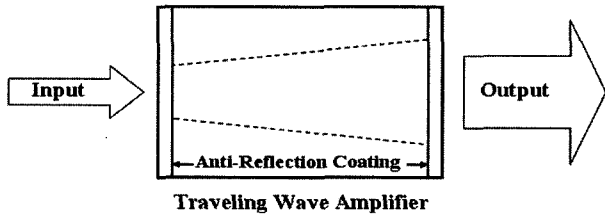


그림 1-(b). TWA 형태의 SOA.

하기 위해서는 0.001% 미만의 반사율이 요구된다.

III. XGM 파장 변환기 원리

XGM 파장 변환 방식은 SOA의 증폭 특성이 입력 광 전력에 따라 증감하는 이득 포화 현상을 이용한 것으로 파장 변환기의 구현이 매우 간단하여 다양한 분야에서 활용된다.

그림 2-(a), (b)는 두 가지의 대표적인 XGM 구조를 나타내고 있다. λ_1 의 파장을 갖고 정보(데이터)를 가진 데이터가 임의의 변조 형태(Modulation Format)를 지닌 신호를 펌프 신호(Pump Signal)라 하고, λ_2 파장의 CW(Continuous Wave) 신호를 프로브 신호(Probe Signal)라 한다. 프로브 신호의 파장인 λ_2 을 갖지만, 펌프 신호의 '1'과 '0' 데이터가 완전히 반전된 데이터 정보를 갖는 신호를 변환된 신호(Converted

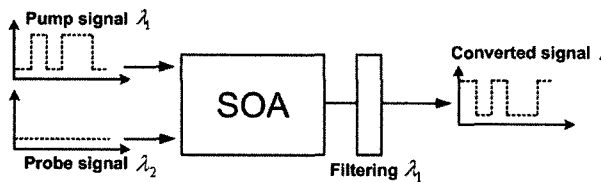


그림 2-(a). 같은 방향 진행 방식 XGM 파장 변환기.

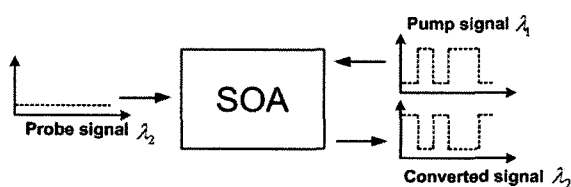


그림 2-(b). 반대 방향 진행 방식 XGM 파장 변환기.

Signal, 이하 '변환 신호'라 명함)라 한다.

펌프 신호와 프로브 신호를 동시에 SOA에 인가하면 펌프 신호의 데이터 상태에 따라 SOA 내의 이득 특성이 변화하는데 SOA는 유도 방출에 의해 SOA로 입사된 모든 신호를 증폭하지만, SOA 내부적으로 광자 밀도의 변화에 따라 캐리어 밀도가 변화하게 되고 이에 따라 SOA의 이득 포화(Gain Saturation) 특성이 변화한다. 이러한 특성 변화를 이용하여 XGM을 해석하자면, 변조된 펌프 신호가 임의의 시간에 '1'인 데이터 상태로 SOA에 입력되면 SOA로 입력되는 정보가 없는 프로브 신호의 파장(λ_2)에는 펌프 신호의 데이터와는 반전되었지만 펌프 신호가 다른 파장(λ_2)에 반전 데이터 정보가 실린 변환 신호가 생성된다고 해석될 수 있다.

IV. XGM 다채널 파장변환기 구성 및 특성 실험

그림 3은 본 논문이 이루고자하는 다채널의 파장 변환기 관점에서 예시 할 수 있는 논문^[1]으로 그림 3을 소개하고자 한다. 이 선행 논문의 파장 변환기는 상호 위상 변조 방식(XPM : Cross Phase Modulation)을 사용하는 single-SOA, 광 써큘레이터(Optical Circulator), 그리고 지연 간섭계(Delay Interferometer)의 복합 구조를 채택하고 있었으며, 10 Gbps RZ 펌프 신호의 파장 부근 대역에서 200 GHz 간격인 8개 파장의 채널들에 펌프 신호의 정보를 실어 8 채널 Broadcasting system을 이루고자 하였다.^[9]

그림 3에 나타난 파장 변환기가 복합적인 구성에 의해 외부 환경에 민감한 영향을 받을 수 있다는 관점을 극복하고, 8개 파장을 갖는 다채널의 상호 변조(Cross Modulation) 특성보다 더욱 많은 WDM 다채널의 프로브 신호들의 상호 변조 특성을 살펴 보고자, 본 논문에서는 그림 4와 같은 실험

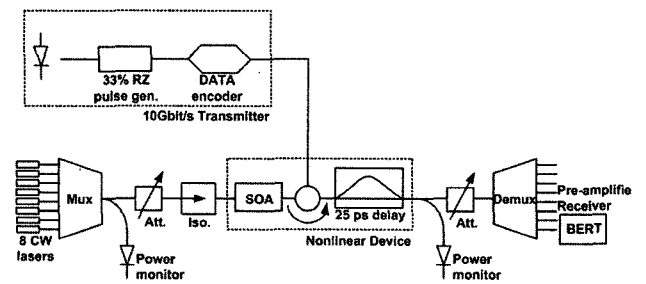


그림 3. Single SOA 구조의 8채널 XPM 파장 변환기.

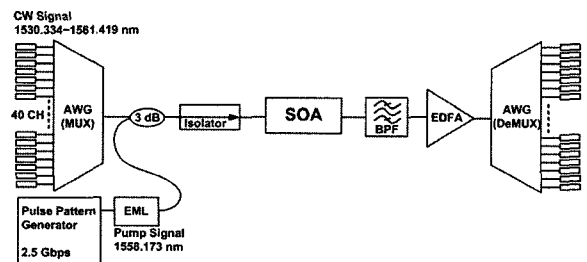


그림 4. 다채널 가변형 XGM 파장 변환 특성 실험 구성.

구성을 하였다. 이 실험 구성을 통해서 2.5 Gbps NRZ 펄프 신호에 의한 넓은 파장 대역에서의 파장 변환 특성을 알아보기로 한다.

프로브 신호로 사용되는 WDM 다채널은 1530.334~1561.419 nm(ITU -T grid), 약 27 nm 대역폭에서 채널 간격이 100 GHz인 연속 발진 레이저들을 사용하였으며 MUX에 의해서 파장 다중 결합된다. 펄프 신호로는 2.5 Gbps 전계-흡수 광 변조기 내장형 레이저(EML : Electro-absorption Modulator integrated Laser)를 이용하여 1558.173 nm 동작 파장을 갖는 2.5 Gbps NRZ(PRBS $2^{31} - 1$) 변조된 펄프 신호를 사용하였다. 40개의 연속 발진 레이저 중 펄프 신호의 파장과 중복된 파장의 레이저는 광학적인 구성 연결은 되어 있지만, 미동작으로 상태로 놓았다. 파장 다중화된 프로브 신호들과 펄프 신호는 3 dB coupler로 결합되어 광아이솔레이터(Optical Isolator)를 거쳐 SOA에 입력 단에 연결되고, SOA 내에서 XGM을 유도한다. 사용된 SOA는 상용으로 제작된 진행파 형태의 SOA(Alcatel사, A1901SOA)가 사용되었다. SOA의 출력 단에는 3 dB 필터 대역폭이 2 nm인 파장 가변형 대역 통과 필터 (BPF : Band Pass Filter)에 의해서 변환 신호들 중 측정하고자 하는 파장의 변환 신호를 분리한다. 파장 가변형 대역 통과 필터에 의해서 선택 분리된 변환 신호는 C-band 광증폭용 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)로 증폭한 뒤에 최종적으로 DeMUX를 이용하여 측정하려는 변환 신호를 추출하도록 구성하였다.

그림 5는 광스펙트럼 분석기(OSA : Optical Spectrum Analyzer)로 살펴본 SOA의 입력단 스펙트럼이다. 펄프 신호의 광세기는 -1.81 dBm이고, 다채널 프로브 신호들의 개별 광세기는 평균 약 -20 dBm이다. 이 스펙트럼을 살펴보면 약 -20 dBm 크기를 갖는 프로브 신호들이 1530.334~1561.419 nm 파장 대역에 나타나고 있으며, 1558.173 nm 파장에 위치한 펄프 신호가 다채널 프로브 신호들이 개별 광세기에 비해 약 18 dB 강한 세기를 가짐으로써 이로 인해 이득 포화 현상이 발현될 것임을 예측 할 수 있다.

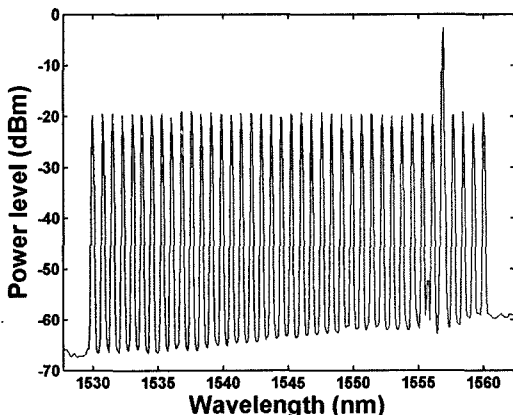


그림 5. SOA 입력 단의 광스펙트럼.

그림 6은 광스펙트럼 분석기로 관측한 SOA의 출력 단의 광스펙트럼으로 다채널 변환 신호들과 펄프 신호이다. 그림 5의 프로브 신호들에 비해 SOA내에서 이득을 다소 얻게되어 변환 신호들이 생성되었음을 알 수 있다. 하지만, 프로브 신호들에 비해 변환 신호들은 광학적 신호대 잡음 비가 최소 10 dB, 최대 20 dB 정도가 줄어들었다. 이러한 현상은 SOA가 이득 포화되어 있었던 동시에 SOA의 방출광(ASE : Amplified Spontaneous Emission)에 의한 현상으로 설명된다.

그림 7에는 DeMUX 단에서 측정된 최종 출력으로 WDM 다채널 변환 신호의 채널 1번부터 채널 34까지의 모든 소광비와 광세기를 동시에 나타내었다. 측정된 소광비는 모두 8.3 dB 이상으로 측정되었다. 펄프 신호가 위치한 1558.173 nm 파장에 근접한 변환 신호 일수록 그의 소광비와 출력 광세기가 동시에 감소하는 경향을 보인다.

실제로 SOA의 이득 곡선은 SOA 내부의 공핍도에 대하여 민감하게 반응하게 된다. 그림 8은 이를 나타낸 그림으로, 캐리어 농도에 대해 변동하는 SOA의 이득 곡선을 보이고 있다. 이러한 이득 곡선의 변동은 소광비에 상당한 영향을 끼치므로 신호 조합에 따른 변동이 있을 수 있다. 이에 따라 펄프 신호의 데이터를 워드 패턴(16 bits word pattern)으로 하여 각 비트의 '1/0'를 임의로 다양한 변화를 시도하여 SOA에서의 캐리어 공핍 정도, 즉 포화 정도를 변화시키는 방법으로 이득 스펙트럼의 변화와 다채널의 소광비의 변화를 관측하였으나,^[3] SOA는 그림 8의 이득 포화 현상 즉, 이미 WDM 다채널 프로브 신호들에 의해서 포화되어 있어 데이터 각 비트의 '1/0' 변동에 의한 소광비의 변화 특성은 없는 것으로 관찰되었다.

그림 9는 WDM 다채널 변환 신호들 중 1534.250 nm 파장의 6번 채널과 1554.134 nm 파장의 31번 채널을 표본으로 정하고 이들 변환 신호들의 눈(Eye) 패턴을 추출하여 관찰한 모습이다. 6번 채널의 눈 높이가 31번 채널보다 높게 나타나 상대적으로 높은 소광비를 보일 수 있음을 나타내고 있으며 전체적으로 좀 더 깨끗한 신호 품질을 보여준다. 이로부터

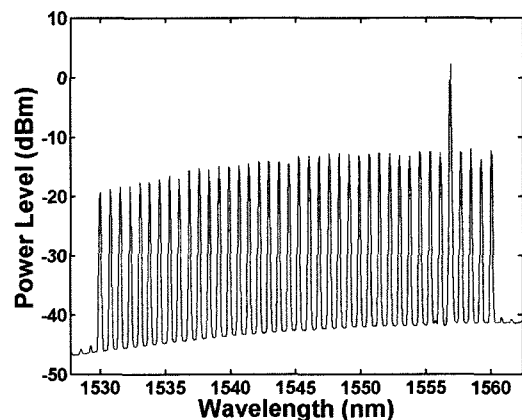


그림 6. SOA 출력 단의 광스펙트럼.

상대적으로 단파장에 위치한 채널이 장파장 대역의 채널에 비해 더 높은 변환 효율을 보임을 알 수 있었다.

그림 10에는 펌프 신호와 WDM 다채널 변환 신호인 6번 채널, 그리고 31번 채널에 대한 비트 오류율을 측정하여 나타내었다. 결론적으로 비트 오류율 10^{-10} 기준에서 펌프 신호 대비 6번 채널은 3.0 dB 파워 페널티(Power Penalty) 그리고 31번 채널은 4.7 dB의 파워 페널티 특성 확인할 수 있었다. 여기서 6번 채널과 31번 채널의 인접 채널들간 4 파장 혼합 효과는 확인 해 본 결과 광스펙트럼 상에서 거의 나타나지 않아 4 파장 혼합 효과에 P에 따른 비트 오류율 증가는 없는 것으로 관찰되었다. 파워 페널티 발생의 근본 원인은 SOA를 이용한 하향 변환(Down-conversion)에 대해서 단파장대로 근접할수록 소광비가 양호하게 나타나는 기존의 실험 결과에 부합한다.^[10]

V. 결 론

본 논문에서는 WDM 다파장의 XGM 가능성과 이에 대한 성능을 확인하였다.

본 논문의 실험에서 사용된 34개 WDM 다채널 변환 신호들에 대해서 측정된 모든 34개 채널에서 8.3 dB 이상의 소광

비를 보였으며, 비트 오류율 성능을 측정한 결과로 비트 오류율 10^{-10} 기준에서 펌프 신호 대비 약 5.0 dB 이하의 파워 페널티 특성을 보였다. 이러한 결과에 의해 Single SOA 기반의 XGM 다채널 가변형 파장 변환기는 2.5 Gbps 기반의 광통신에서 충분히 사용 가능하며, 최근 SOA의 Carrier Life Time을 향상 시키는 결과들을 볼 때에 고속의 신호에도 널리 사용할 수 있는 장점들을 확인하였다.

향후 본 논문에서와 달리 펌프 신호와 프로브 신호의 상호 반대 방향 진행 방식 XGM 구조 적용하고 대역 제한 여과기(BRF : Band Reject Filter)를 사용한 펌프 신호 분리-제거하여 EDFA 등의 증폭단을 제거한 저비용 고효율의 다파장 다

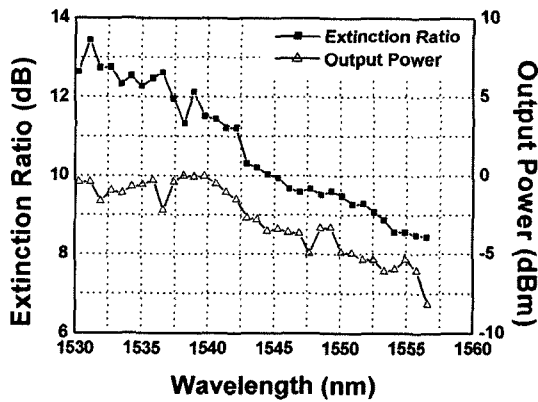


그림 7. 변환 신호들의 소광비와 광세기 특성.

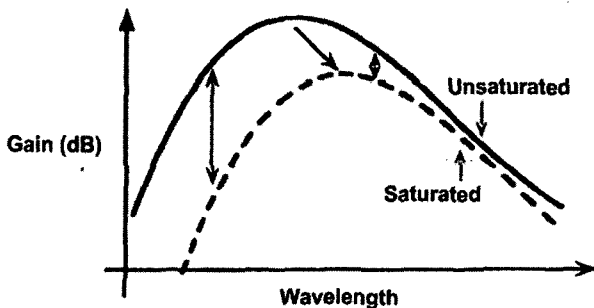


그림 8. 캐리어 공핍도와 이득 변화 현상.

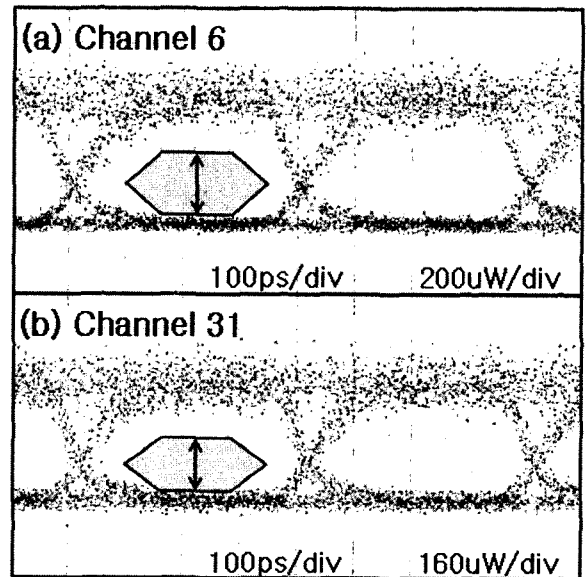


그림 9. WDM 다채널 변환 신호들 중 6번 채널과 31번 채널의 패턴 특성.

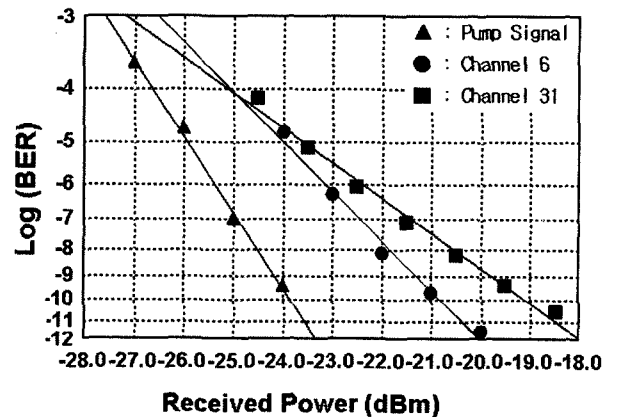


그림 10. WDM 다채널 변환 신호들 중 6번 채널과 31번 채널의 BER 특성.

채널 Broadcasting system 구현을 기대한다.

참고문헌

- [1] D. Z. Chen, G. Wellbrock, N. Robinson, S.Y.Park, C. Burton, S.J.Penticost, F.Liu, and P.Mamyshev, "Lon-hall "Hut-Skipped" transmission of mixed 10&40 Gb/s signals over deployed SSMF fiber in MCI's Dalla fiber loop using hybrid Raman-Erbium doped fiber amplifiers," in *Optical Fiber Conference '05*, Optical Society of America, Anaheim, USA, OTuH6, 2005.
- [2] R. Ludwig and G. Raybon, "BER measurements of frequency converted signal four-wave mixing in a semiconductor laser amplifier at 1, 2.5, 5 and 10Gbit/s," *J. Electron. Letter.*, vol. 30, no. 4, pp. 338-339, 1994.
- [3] T. Durhuus, R. J. S. Pederson, B. Mikkelsen, K. E. Stubkjaer, M. Oberg, and S. Nilsson, "Optical wavelength conversion over 18nm at 2.5Gbit/s by DBR laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 86-88, 1993.
- [4] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, and K. E. Stubkjaer, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," *J. Lightwave Technol. Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 942-954, 1996.
- [5] M. Asghari, I. H. White, and R. V. Penty, "Wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 7, pp. 1181-1190, 1997.
- [6] S. J. B. Yoo, "Wavelength conversion technologies for WDM network applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 955-966, 1996.
- [7] A. Kloch, P. B. Hansen, D. Wolfson, T. Fjelde, and K. Stubkjaer, "Wavelength converters," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E82-B, no. 8, pp. 1209-1220, 1999.
- [8] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjaer, "Wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 942-954, 1996.
- [9] J. L. Pleumeekers, J. Leuthold, M. Kauer, P. G. Bernasconi, and G. A. Burrus, "All-Optical Wavelength Conversion and Broadcasting to Eight Separate Channels by a Single Semiconductor Optical Amplifier Delay Interferometer," in *Optical Fiber Conference '02*, Optical Society of America, Anaheim, USA, pp. 596-597, 2002.
- [10] A. E. Willner and W. Shieh, "Optimal spectral and power parameters for all-optical wave-length shifting: single stage, fanout and cascability," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 771-781, 1995.

Development of 2.5 Gbps Multi-Channel Tunable Wavelength Converter Based on Cross Gain Modulation in Semiconductor Optical Amplifier

Jung-Min Son[†] and Sang-Sun Lee

Communication lab, Division of Electrical and Computer Engineering, Han-yang university,
17 Hang-Dang-Dong, Sung-Dong-Gu, 133-791, Seoul Korea

[†]E-mail: ssnlee@hanyang.ac.kr

(Received April 15, 2005, Revised manuscript June 16, 2005)

A new structure of tunable wavelength converter based on XGM in SOA was tried and analyzed. This converter used single SOA and had very simple structure.

In this paper, results were experimentally obtained and demonstrated. Pump signal was generated with NRZ (PRBS $2^{31}-1$) and data rate 2.5 Gbps. WDM multi converted signals showed more than 8.3 dB extinction ratio. For BER performance, all these converted signals had within 5.0 dB power penalty compared with the pump signal.

With these results, we showed that this converter was suitable for 2.5 Gbps WDM multi-channel wavelength converting.

OCIS Codes : 250.0250, 250.4480, 250.5980, 250.7360.