

다중 양자 우물 구조의 전계 흡수 변조기의 혼변조 왜곡 특성

論 文

54C-6-10

Intermodulation Distortion in Multiple Quantum-Well Electroabsorption Modulator

尹榮高[†] · 崔永完^{*}

(YoungSeol Yun, Young-Wan Choi)

Abstract - Linearity is an important property of optical devices for analog communications. In this paper, we study the 3rd-order intermodulation distortion (IMD3) of an InP/InGaAsP multiple-quantum-well (MQW) traveling-wave type electroabsorption modulator (TW-EAM). We observe abnormal notches in the IMD3 results those were different from notches by general transfer curve of electroabsorption modulators (EAMs). We analyze the phenomena through absorption coefficients according to wavelengths and bias voltages to verify appearance of the abnormal notches, where it can be known to result from Stark-shift and broadening. We propose the method to enhance linearity of MQW-EAMs by using these effects.

Key Words : Traveling-wave type, 전계흡수 변조기, 비선형성, 아날로그-광통신

1. 서 론

밀리미터파 대역 통신을 위해, 고속 동작이 가능한 광변조기와 복호기는 필수 요소이다. 다중 양자 우물 (MQW, multiple-quantum-well) 구조를 가진 전계 흡수 변조기 (EAM, electroabsorption modulator)는 소형, 경량, 낮은 전원 전압과 고속 동작 가능성 때문에 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다: 약 60 GHz의 3 dB 대역폭을 갖는 집중형 (Lumped-type) EAM 소자가 발표되었고[1], 60 GHz 대역에 디지털 정보를 실어 85 km 전송하는 전송실험이 이 소자를 이용하여 행해졌으며[2], 송수신기를 하나의 모듈로 제작된 EAT (electroabsorption transceiver)가 제작/발표되었다[3].

집중형 EAM은 RC 시정수에 의한 제한 때문에 대역폭을 늘리기 위해서는 전극의 크기를 최소화 해야 하는데, 이는 변조 효율을 열화시키는 것으로 알려졌다[1]. 변조효율의 열화 문제를 극복할 수 있도록 제안된 구조가 진행파형 (Traveling-wave type) EAM (TW-EAM)이다. 이 구조는 Capacitance를 도파로를 따라 분포시키는 전극 구조를 가지며, 50 GHz 이상의 3 dB 대역폭 성능이 보고되었다[4].

EAM에 대한 응용 영역 중의 하나가 밀리미터파 대역을 이용하는 아날로그 통신이다. 아날로그 통신용 소자의 주요 특성 중의 하나가 선형성이며, 소자의 선형 특성은 혼변조 왜곡 (IMD, intermodulation distortion), SFDR (spurious-

free dynamic range) 등으로 표현된다. 혼변조 왜곡 신호 중에서 3차 혼변조 왜곡 (IMD3, 3rd-order intermodulation distortion) 신호는 주 신호와 인접하여 발생하므로, 이 신호 성분의 크기를 최소화 하는 것이 아날로그 통신에서는 매우 중요한 관심거리이고, 이를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

집중형 EAM의 선형성에 관련된 연구가 이미 상당수 발표되었으며[5-8], 선형화 방법으로써 QCSE (Quantum-Confined Stark Effect)의 파장 의존성을 이용하는 방법[5], 전치왜곡을 이용하는 방법[6], Feed-forward 법을 이용한 방법[7], 그리고 Intra-step-barrier quantum-well 구조를 이용한 방법[8] 등이 구현되었다.

그러나 그 응용범위의 대부분이 수 GHz 대역 내로 제한되었다. TW-EAM의 선형성에 대해서는 최근에 연구 결과가 발표되었으나[9-10], 전원전압과 입력 광전력 등의 조건에 따른 특성의 차이에 대한 자세한 분석은 다루어지지 않았다. 그리고 TW-EAM의 선형화 방법과 관련된 연구 결과는 아직 발표되지 않은 것으로 사료된다.

본 연구에서는 InP/InGaAsP 물질을 이용하여 제작된 MQW TW-EAM의 IMD3를 측정하였으며, 일반적인 전달함수에 의한 비선형 특성이 아닌 다른 요인에 의한 비선형 특성을 발견하였다. 이 현상의 규명을 위하여 파장과 전원전압에 따른 흡수 분포와 전달함수에 의한 비선형 특성들을 분석하였다. 2장에서는 제작된 MQW TW-EAM의 기하학적인 구조에 대해 설명하고, 3장에서는 전원전압에 따른 IMD3의 결과를 보이고, 일반적이지 않은 IMD3의 notch (이차 abnormal notch)을 소개한다. 4장에서는 QCSE가 소자의 선형성에 미치는 영향을 흡수 프로파일을 통해 분석한다. 5장에서는 예측된 모델에 대한 검증용 파장 별 IMD3 특성 측정을 통해 검증하고, 마지막으로 결론에서는 MQW 형태의

[†] 교신저자, 正會員 : 중앙大學 전자전기공학부 博士課程
E-mail : duddnd@empal.com

^{*} 正會員 : 중앙大學 전자전기공학부 正教授 · 工博
接受日字 : 2005年 5月 3日
最終完了 : 2005年 5月 11日

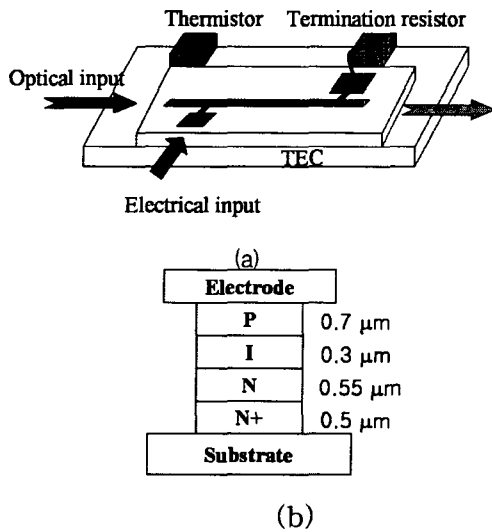


그림 1. 제작된 모듈의 구성도 (a)와 소자의 단면 (b)
 Fig. 1. Geometrical structure of the fabricated module (a) and cross-section of the TW-EAM (b)

2. 장 제작된 모듈의 기하학적 구조

본 연구에서 제작된 TW-EAM은 InP/InGaAsP 기반의 MQW 구조를 가지고 있다. 그림 1(a)는 제작된 TW-EAM 모듈의 개략적인 구성도이다. 이 모듈은 온도 제어를 위한 thermistor와 TEC (thermo-electric cooler)가 내장되어 있으며, 소자의 3 dB 대역폭 확장을 위해 RF 출력단에 50 W의 중단 저항을 와이어 본딩을 이용하여 소자와 연결하였다[11]. 그림 1(b)는 제작된 소자의 단면을 나타낸다. 변조에 관여하는 도파로의 길이는 100 mm로 제작하였으며, 신호 전극의 폭은 4 mm이다.

MQW 형태의 EAM은 편광 모드에 따라 각기 다른 특성을 보인다. 본 소자는 well과 barrier에 strain을 가하여 편광 의존성을 줄이고자 하였으며, 측정 결과 TE 모드와 TM 모드에 1 dB 미만의 작은 차이를 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 편광 모드 제어기(PMC, polarization mode controller)를 사용하지 않고 측정을 수행하였다.

3. 장 3차 혼변조 왜곡

아날로그 광통신용 소자의 경우, 주 신호와 인접하여 발생하는 3차 혼변조 왜곡 신호를 최소화하는 것이 주요한 과제이다. 그림 2는 제작된 TW-EAM 모듈의 IMD3 측정 결과이다. IMD3를 측정하기 위하여, 2 GHz를 중심주파수로 하여 ±50 kHz RF 2-tone 신호를 입력하였으며, 각 신호의 크기는 6 dBm으로 하였다. 그리고 파장과 TEC의 설정 온도는 각각 1550 nm와 25 °C이며, 광 포화에 의한 영향을 최소화하고 측정의 유효성을 확보하기 위해 입력 광전력은 4 dBm으로 하였다. 제작된 모듈의 0 V에서의 삽입손실은 12 dB이다.

그림 2(a)에서 분석에 의한 결과는 측정된 전달곡선(그림 2(b))을 29차 polynomial을 이용하여 근사화 시켜서 IMD3를

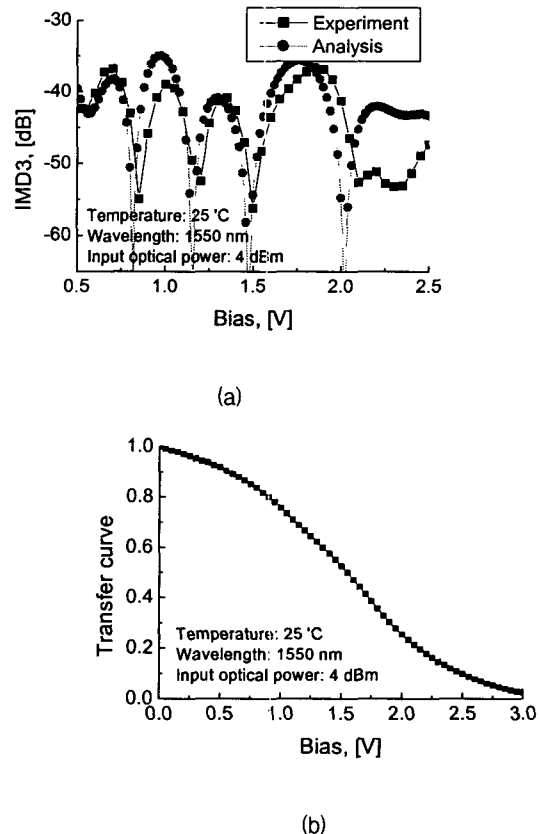


그림 2. 전원전압에 따른 3차 혼변조 왜곡(a)와 전달함수(b)
 Fig. 2. 3rd-order intermodulation distortion (a) and transfer curve (b) vs. a bias voltage

구한 것이다. Polynomial의 차수가 10차 이상인 경우에 계산 결과의 차이는 크지 않았으나, 정확성과 계산시간을 고려하여 본 연구에서는 29차 polynomial로 결정하였다. 이 결과는 제작된 TW-EAM에 대해 측정된 IMD3 특성 결과와 잘 일치함을 보이고 있다. 전원전압이 2 V이상인 지점에서의 측정치와 분석치의 불일치는 기술기의 급격한 감소에 기인한 것으로 판단된다. 그림 2(a)를 보면, 0.8 V와 2.1 V에서 일반적 전달함수의 변곡점에 의한 IMD3의 notch가 있음을 확인할 수 있으며, 1.2 V와 1.5 V에서도 notch가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 상용으로 제작된 Agere사의 EML에서도 나타나는 현상으로써, 이에 대한 원인은 아직까지 발표되지 않은 것으로 사료된다. 따라서 본 연구의 목적은 이러한 일반적이지 않은 notch (이하 abnormal notch)의 원인을 규명하는데 있으며, 다음 장에서는 제작된 모듈의 흡수 프로파일을 측정하여 그 원인을 분석한다.

4. 장 흡수 프로파일

흡수 프로파일을 측정하기 위하여, Agilent사의 8168D tunable laser source를 사용하여 1500에서 1560 nm까지 파장범위에서 8 dBm 입력 광전력에 대한 투과량을 측정하여 흡수계수를 계산하였다. 그림 3에 전원전압에 따른 투과 프로파일을 파장별로 도시하였다. 그림 3을 보면, 전원전압에 따라서 기울기와 모양이 변함을 알 수 있다. 이는 제작된

TW-EAM이 MQW 구조를 가지므로, 각 전원전압에 따른 QCSE에 의해 프로파일이 결정된 것이다.

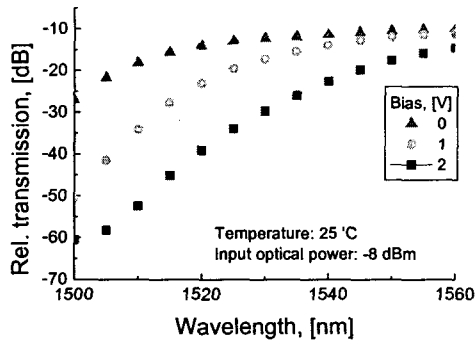


그림 3. 그림 3. 전원전압에 따른 투과 프로파일
Fig. 3. Transmission profile according to bias voltage

측정된 투과 프로파일을 이용하여 각 파장과 전원전압에 대해 흡수 프로파일을 구하였다. 흡수 계수, α [1/cm]를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\alpha = -23.0259 T \quad (1)$$

여기서, T는 입력 광전력에 대한 출력 광전력의 비로써, 단위는 dB이다.

일반적으로 흡수 프로파일은 파장에 대해 다음과 같은 식을 이용할 수 있다.

$$\alpha(\lambda, V_b) = M_v \exp(A_v \lambda_d^{B_v}) + C_v \quad (2)$$

여기서, M_v , A_v , B_v 와 C_v 는 전원전압에 대한 함수로써, 각각 흡수 프로파일의 크기와 파장 오프셋, 기울기 및 흡수계수 오프셋에 영향을 주는 계수들이다. 그리고 λ_d 는 측정치와 계산치의 오차를 최소화하기 위해 $(\lambda - 1500)/100$ 으로 하였다. V_b 는 전원전압이다.

TW-EAM의 비선형성과 관련하여 전원전압의 관심영역은 1~2 V 사이이다. 본 연구에서는 IMD3의 abnormal notch이 Stark-shift와 broadening에 의해 흡수 프로파일의 모양과 기울기가 불규칙적으로 변하여 발생하는 것으로 예상하여, 식 (2)에서 흡수 프로파일의 모양에 가장 큰 영향을 미치는 A_v 와 B_v 값의 변화를 관찰하였다. 그림 4는 A_v 와 B_v 의 값을 전원전압에 대하여 도시한다. 1.2 V 근처와 1.5 V 근처에서 A_v 와 B_v 값의 변화가 급격함을 볼 수 있다. 이러한 변화는 흡수계수의 급격한 변화를 나타내는 것이 아니라, 흡수 프로파일의 모양의 미세한 불규칙성을 표현하는 것이다. 전원전압에 따른 흡수계수의 변화를 나타내는 일반적인 식은 기하급수 함수이다. 이 함수를 이용하여 A_v 와 B_v 값을 표현하였을 때에는 각 값의 급격한 변화는 관찰되지 않았다. 이 결과를 통해, 흡수 프로파일의 모양이 특정 전원전압에서 불규칙적으로 변화함을 알 수 있으며, 이 현상이 IMD3의 abnormal notch를 발생시킴을 예상할 수 있다. 흡수 프로파

일의 모양의 변화는 전술한 바와 같이 Stark-shift와 broadening에 의해 좌우된다. 전원전압 1.1 V와 1.5 V인 지

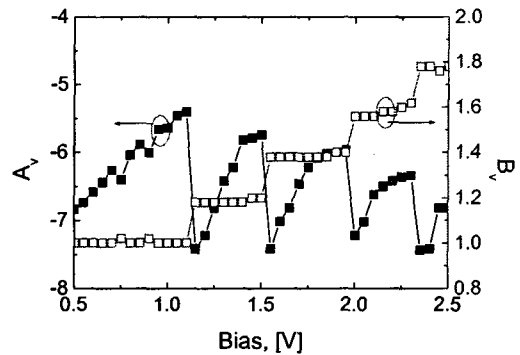


그림 4. 식 (2)를 위한 Av와 Bv의 값
Fig. 4. Value of A_v and B_v for eq. (2) vs. a bias

점에서의 흡수 프로파일의 불규칙적인 변화 또한 이러한 효과에 기인한 것으로 예상된다.

5. 장 파장에 따른 IMD3

본 장은 그림 2의 IMD3 특성 측정을 위해 적용된 1550 nm 파장에서의 흡수 계수의 변화를 분석하고, 파장에 따른 특성의 변화를 통해 3장의 결과를 검증한다.

그림 5는 파장이 1550 nm이고 입력 광전력이 4 dBm일 때, 투과된 광전력으로 부터 계산된 흡수계수의 1차와 2차 미분 값이다. 그림 5에서, 흡수 계수의 1차 미분 값은 흡수계수의 변화량이 불규칙적임을 나타내고 있다. 일반적으로 전원전압에 따른 흡수 계수의 변화량은 일정한 규칙성을 가진다. 이러한 규칙적인 증가로 인한 IMD3의 notch는 0.8 V와 2.1 V에서 보이는 것과 같이 두 개가 일반적으로 나타난다. 그러나 제작된 TW-EAM 모듈에서의 흡수 계수의 변화량을 살펴보면, 1.2 V와 1.5 V의 전원전압에서 나타나는 것처럼 흡수 계수의 변화량이 불규칙적이며, 이것에 의해 IMD3의 abnormal notch이 발생하게 된다. 그림 5에서 IMD3의 notch이 2차 미분의 꼭지점과 위치가 다른 이유는, 흡수 계수가 전달함수식에서 지수함수의 지수부에 위치하므로, 흡수계수의 3차 미분 값뿐만 아니라 1차와 2차 미분 값에 의해 영향을 받기 때문이다.

흡수 계수 변화의 불규칙성이 Stark-shift와 broadening에 의해 발생한다면, 이러한 불규칙성은 입력 광의 파장에 따라 다르게 작용될 것을 예상할 수 있다. 즉, 좀 더 짧은 파장에서 IMD3의 notch가 생기는 전원전압은 긴 파장에서의 전원전압보다 낮아질 것이다. 이를 검증하기 위하여, 그림 6은 1540 nm와 1560 nm에서의 IMD3 측정 결과와 1550 nm에서의 IMD3 측정 결과를 보여준다.

그림 6을 살펴보면, 짧은 파장이 적용된 경우의 두 개의 abnormal notch는 모두 낮은 전원전압에서 나타남을 알 수 있다. 이것은 notch가 Stark-shift와 broadening에 의해 영향을 받은 것임을 재확인시켜 주는 것이라 할 수 있을 것이다. 그리고 10 nm 파장 차이에 대해, 첫번째 notch는 0.05 V의 전원전압 차이를 보이는 반면, 두번째 notch는 0.15 V의 전원

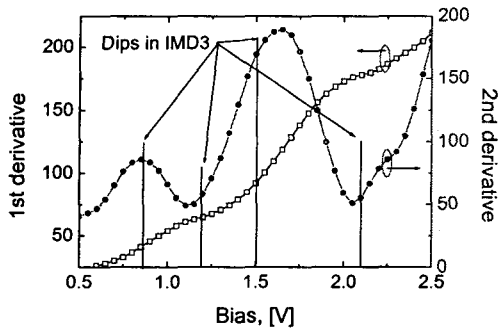


그림 5. 흡수 계수의 1차와 2차 미분값 (파장: 1550 nm)
 Fig. 5. 1st and 2nd derivatives of absorption coefficients at the wavelength of 1550 nm

전압의 차이를 보인다. 즉 첫번째 abnormal notch에서의 전압의 변화가 두번째 abnormal notch에서의 변화보다 크다는 것을 알 수 있다.

파장 1550 nm와 선형성이 가장 양호한 전압전압에서 제작

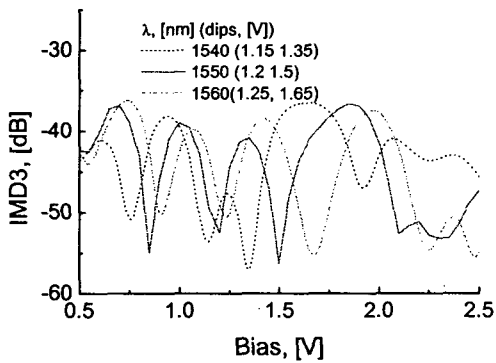


그림 6. 파장에 따른 IMD3의 비교, (입력 광전력: 4 dBm)
 Fig. 6. Comparison of IMD3 according to wavelength with input optical power of 4 dBm

된 TW-EAM을 이용하고자 한다면, 전압전압의 범위가 좁아 전압회로가 복잡해질 수 있다. 본 연구에서 확인된 결과를 토대로 0 V에서 exciton peak이 생기는 파장을 조정하거나 사용 파장을 바꿈으로써 broadening과 Stark-shift에 의해 생성되는 두 개의 abnormal notch를 근접시킬 수 있고, 이를 통해 넓은 전압전압 범위에서 양호한 선형특성을 가질 수 있을 것이다. 그림 6의 1540 nm 파장에 대한 IMD3 결과는 사용 파장을 바꾸는 방법에 대한 실현 가능성을 보여주고 있다.

6. 장 결론

본 논문에서는 InP/InGaAsP 물질을 이용한 MQW TW-EAM을 제작하여 비선형 특성을 측정하고 일반적이지 않은 IMD3의 notch에 대한 원인을 분석하였다. 제작된 TW-EAM의 IMD3를 측정하였으며, 전달 곡선을 이용하여 계산한 IMD3 결과와 유사함을 확인하였다. 그리고 IMD3

측정 결과에서 일반적으로 나타나는 IMD3의 notch 이외의 두 개의 notch를 발견하였으며, 이 notch의 분석을 위하여 흡수 프로파일을 측정하고 등가 수식을 이용하여 notch가 QCSE의 Stark-shift와 broadening에 의해 발생함을 추론하였다. 그리고 파장에 따른 IMD3 특성을 측정하고 그 결과가 추론과 일치함을 확인하였다. 즉, MQW 형태의 TW-EAM에서 Stark-shift와 broadening이 IMD3에 영향을 줌을 확인하였다.

그리고 본 연구에서 제작된 TW-EAM 아날로그 광통신용 소자로 사용하고자 하였을 때, 전압전압을 IMD3가 최소가 되는 지점으로 설정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 제작된 소자의 경우, 1550 nm에서 notch가 생기는 전압전압의 범위가 좁아서 전압전압을 설정하기 어려울 것으로 판단된다.

이를 극복하기 위해서는, 사용 파장을 바꾸거나 0 V에서 exciton peak이 생기는 파장을 조정함으로써 Stark-shift와 broadening에 의해 발생하는 IMD3의 notch가 생기는 두 개의 전압전압을 가까이 있게 하면 좀 더 넓은 범위에서 IMD3의 notch를 가질 수 있을 것이며, 이를 통해 간단한 전압전압 회로와 더불어 안정적인 통신 성능을 확보할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 중앙대학교 학술연구비 (일반연구비) 지원에 의한 것임

참 고 문 헌

- [1] N. Dagli, "Wide-Bandwidth Lasers and Modulators for RF Photonics," IEEE Microwave Theory and Technol., Vol. 47, No. 7, July, 1999
- [2] T. Kuri, K. Kitayama, A. Stohr, and Y. Ogawa, "Fiber-Optic Millimeter-wave Downlink System Using 60 GHz-Band External Modulator," Journ. of lightwave Technol., vol. 17, no. 5, May 1999
- [3] T. Kuri, K. Kitayama, Y. Takahashi, "60-GHz-Band Full-Duplex Radio-On-Fiber System Using Two-RF-Port Electroabsorption Transceiver," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, No. 4, April, 2000
- [4] K. Kawano, M. Kohtoku, M. Ueki, T. Ito, S. Kondoh, Y. Noguchi, and Y. Hasumi, "Polarization insensitive traveling wave electroabsorption (TW-EA) modulator with bandwidth over 50 GHz and driving voltage less than 2V," Electron. Lett., Vol. 33, no. 18, Aug. 28, 1997
- [5] K. K. Loi, J. H. Hodiak, X. B. Mei, C. W. Tu, and W. S. Chang, "Linearization of 1.3-um MQW Electroabsorption Modulators Using an All-Optical Frequency-Insensitive Technique," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, No. 7, July, 1999
- [6] G. C. Wilson, T. H. Wood, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, S. B. Krasulick, J. E. Johnson, T.

Tanbun-Ek, and P. A. Morton, "Analog transmission at 1.55 μm using linearised electroabsorption modulator/DFB laser and fiber amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 31, Oct. 1995

[7] T. Iwai, K. Sato, and K. Suto, "Signal Distortion and Noise in AM-SCM Transmission Systems Employing the Feedforward Linearized MQW-EA External Modulator," *Journ. of Lightwave Technol.*, Vol. 13, No. 8, Aug. 1995

[8] J. X. Chen, Y. Wu, W. X. Chen, I. Shubin, A. Clawson, W. S. C. Chang, and P. K. L. Yu, "High-Power Intrastep Quantum Well Electroabsorption Modulator Using Single-Sided Large Optical Cavity Waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 16, No. 2, Feb. 2004

[9] B. Liu, J. Shim, Y. Chiu, H. F. Chou, J. Piprek, and J. E. Bowers, "Slope Efficiency and Dynamic Range of Traveling-Wave Multiple-Quantum-Well Electroabsorption Modulators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 16, No. 2, Feb. 2004

[10] B. Liu, J. Shim, Y. J. Chiu, A. Keating, J. Piprek, and J. E. Bowers, "Analog Characterization of Low-Voltage MQW Traveling-Wave Electroabsorption Modulators," *Journ. of Lightwave Technol.*, Vol. 21, No. 12, Dec. 2003

[11] S. Irmscher, R. Lewen, and U. Eriksson, "InP-InGaAsP High-Speed Traveling-Wave Electroabsorption Modulators With Integrated Termination Resistors," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 14, No. 7, July 2002

저 자 소 개



윤 영 실(尹榮高)
 1998년 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 중앙대학교 첨단영상전문대학원 (공학 석사)
 2001년~중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
 [관심분야] 밀리미터파 대역용 아날로그 광송신기, 광증계기, 비선형 특성, 진행파형 전계흡수 변조기



최 영 완(崔永完)
 1985년 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 버팔로 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 전기 및 컴퓨터 공학과 (공학석사)
 1992us 버팔로 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 전기 및 컴퓨터 공학과 (공학박사)
 1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI), 선임연구원
 1995년 ~ 중앙대학교 전자공학과 정교수
 [주관심분야] Microwave-photonics, optical interconnection, optical devices