

# 다중 양자우물 아날로그 광변조기의 선형성 해석

정회원 김경현\*, 이규웅\*\*, 한상국\*\*

## Linearity analysis of MQW analog optical modulators

Kyung-Hyun Kim\*, Gyu-Woong Lee\*\*, Sang-Kook Han\*\* *Regular Members*

### 요 약

광대역 아날로그 SCM 광전송 시스템을 위한 MQW 전계흡수 광변조기에서 입력 바이어스전압에 대한 전달특성곡선을 이용하여 광변조기의 구조변화에 대한 선형성 변화를 해석하였다. 양자우물 개수와 변조기 길이가 증가함에 따라 CSO(composite second-order distortion)를 상쇄시키는 동작점은 작은 바이어스로 이동하였고 CTB(composite triple beat distortion)변화는 두 경우에서 큰 차이를 보이지 않았다. 파장 detuning에 대해서는 CSO와 CTB 모두 일정한 변화경향을 나타내지 않았는데 이는 광변조기의 양자우물에서 엑시톤에 의해 바이어스에 따른 흡수정도가 비선형적으로 변화하기 때문이다.

### ABSTRACT

Linearity of MQW electroabsorption optical modulators for broad band analog SCM optical transmission systems have been analyzed by varying the structure of optical modulators. Increasing the number of quantum well and modulator's length, the DC bias operating point which has the minimum CSO(composite second-order distortion) was shifted to the low bias voltage. The variation of CTB(composite triple beat distortion) was negligible for the number of quantum well and modulator's length variations. Since the absorption variation of quantum well considering exciton effect is nonlinear for bias voltage variation, both CSO and CTB enhancement could not be related to the wavelength detuning.

### I. 서 론

현재 기간망으로서 유무선 통신기술은 급변하는 현대인의 다양한 정보욕구와 멀티미디어 서비스와 같은 고용량의 다양한 정보에 대하여 고속의 안정적 송수신을 가능하게 하고, 또한 보다 많은 이용자를 수용할 수 있는 차세대 통신망으로서 광통신을 이용한 초고속 정보 통신망이 중요한 대안으로서 떠오르고 있다. 한편 초고속 데이터 전송을 위한 차세대 무선 멀티미디어 시스템에서는 보다 효율적인 정보 전송을 위해 광대역의 높은 bit rate를 갖는 전송속도가 요구되며, 이때 이러한 유무선 통신망의 초고속화와

광대역화의 일환으로 현재 통신시장의 선두가 되는 무선통신분야에서, 기존의 cellular 또는 PCS 통신망 사용자의 coverage를 높이기 위한 방법으로 photonic device를 이용한 RF 광변환 네트워크가 강하게 부각되고 있다. RF 광변환 네트워크는 사용자의 coverage를 높이기 위해 기하급수적으로 증가되는 base station과 remote antenna수의 집적화를 가능하게 하여, 각 base station에서 RF 변환을 위한 부가적인 하드웨어 변환모듈이 불필요하게 된다. 또한, 집적화를 통하여 집적화된 시스템 구성으로 인한 유지보수가 편리해지게 되며, 광변환/다중화 방식에 의한 집적화된 시스템에서의 RF carrier의 동적할당을 가능하게 함으로써 기존의 PSTN망을 이용한 유무선 통합망과

\* 연세대학교 전파통신연구소(skhan@bubble.yonsei.ac.kr)

\*\* 연세대학교 대학원 기계·전자공학부

논문번호 : 98283-0706, 접수일자 : 1998년 7월 6일

※ 본 연구는 1998년 정통부 국책과제(98-036)의 지원에 의해 수행되었음.

비교하여 고속의 광대역, 정보전송이 가능하다는 장점을 지닌다.

이러한 광변환 기술의 가장 중요한 부분으로서 RF 신호의 광변조 방법에 대한 노력이 수년 전부터 집중적으로 연구되고 있으며, remote antenna에 수신되는 RF신호를 광 subcarrier로 변환하는 광변환 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광대역 아날로그 SCM 광전송망에 요구되는 광변환 기술은 다수 채널을 위한 다중 RF carrier 신호의 인가에 따른 인접채널의 intermodulation 신호인 CSO(composite second-order distortion)과 CTB(composite triple beat distortion)을 최소화하기 위한 소자의 선형성 확보가 아날로그 SCM 분배망의 광변환 시스템에서는 가장 중요한 부분을 차지하고 있다.

레이저의 직접변조 과정에서 발생하는 처핑(chirping)에 따른 신호의 비선형 왜곡은 아날로그 RF 신호에 커다란 문제점으로 지적되어왔다. 이러한 직접변조에 의한 레이저의 비선형적인 특성을 최소화하기 위하여 외부변조방식을 이용한 광변환기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 외부변조기를 이용한 광변환기술을 통하여 10GHz 이상의 고속 광변조시 처핑에 의한 문제점을 해결할 수 있게 되었다. 이러한 배경에서 변조기의 L-V(light power versus voltage)전달 곡선이 비교적 단순한 정현함수(cosine function)의 전달특성을 갖는 LiNbO<sub>3</sub> MZI(Mach-Zender Interferometer) 외부변조기가 AM-SCM 광전송장치로서 적용될 수 있음이 보고되었다<sup>[1]</sup>. 그러나 이러한 LiNbO<sub>3</sub> MZI변조기는 전력소비가 크고, 고비용이며, 삽입손실을 줄이기 위한 레이저와의 단일집적이 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 화합물 반도체를 이용한 전계흡수 광변조기(electroabsorption optical modulator)가 광변환 링크 변조기로서 새롭게 부각되고 있다. 반면 전계흡수 광변조기는 MZI변조기와는 달리 복잡한 지수 함수적인 L-V 전달특성을 지니기 때문에 비선형적인 전달함수 특성에 대한 선형화가 필요하다. 그러나 MZI변조기의 비선형적인 출력 특성에 대한 분석과 그에 따른 변조기의 선형화방법에 대해서 그동안 많은 연구가 진행되어진 것에 비하여 MQW(multiple quantum-well) 전계흡수 변조기에서의 비선형성에 관한 연구는 미미한 실정이다.

논문에서는 광대역 아날로그 SCM 광전송 시스템을 위한 MQW(multiple quantum well) 전계흡수 광변조기의 선형성을 변조기 구조변화에 대해 고찰한다. 변조기의 비선형 전달특성의 물리적 요인이 될 수

있는 변조기의 길이, 양자우물 개수, 동작파장의 변화에 의한 전달특성의 변화를 통하여 intermodulation의 영향, 즉 CSO와 CTB를 구하고 각각의 변화를 고찰한다. 또한 CSO, CTB변화를 통하여 아날로그 광변조기 동작조건의 변화를 조사하고 전계흡수 광변조기 구조개선을 통한 선형성 향상정도를 알아본다. 2절에서는 광변조기의 선형성 분석방법에 대하여 기술하고 3절에서는 intermodulation 특성변화를 통하여 MQW 전계흡수 광변조기의 선형성 변화를 분석하였다.

## II. MQW 전계흡수 광변조기의 선형성 모델

논문에서 사용된 광변조기는 InGaAsP/InGaAsP MQW 흡수층을 가진 deep ridge 구조를 가진다. 이때 양자우물과 장벽물질의 밴드갭 파장은 각각 1.50 $\mu$ m와 1.1 $\mu$ m이며 폭은 5nm, 20nm이다<sup>[2]</sup>. 입력 광 파장(input wavelength)은 1.55 $\mu$ m이며, 다수의 양자우물을 포함한 흡수층의 두께와 폭은 0.25 $\mu$ m, 3 $\mu$ m로 고정하였다. 일반적으로 LiNbO<sub>3</sub> MZI변조기에서의 전달함수는 정현함수로 표현되며, 입력신호에 대하여 2차 함수의 비선형특성을 지닌다<sup>[3]</sup>.

$$P_{out} = \frac{1}{2} [1 + \cos(\varphi_0 + \frac{\pi}{V_{\pi}} v)] P_{in} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} E_0^2 \cos^2[-\frac{\varphi_0}{2} - \frac{1}{2} \frac{\pi}{V_{\pi}} v]$$

$P_{in}$ ,  $P_{out}$  은 각각 MZI에 입력되는 광 입력, 출력의 의미이며,  $\varphi_0$  는 MZI변조기의 고유 위상차이며,  $E_0$  는 광전계의 크기를,  $V_{\pi}$  는 180 위상차를 만드는 바이어스 전압을 의미한다. 이러한 MZI구조에서의 변조기의 출력특성에 의한 비선형 출력은 전달함수의 굴곡점(inflexion point)에서 기함수 대칭(odd symmetry)의 특성을 지닌다. 이러한 출력특성에 의해 오직 홀수 차수의 harmonic 신호만 변조기의 출력으로 나오게 되고, 이때 출력특성에 의한 3차성분 출력이 변조기의 동작영역을 좌우하는 비선형 신호의 주된 원인으로 작용하게 된다. 반면 MQW 전계흡수 광변조기에서는 전달함수의 특성을 좌우하는 원인이 MZI변조기와는 달리 아직까지 정확하게 규명되지 않고 있다. 따라서 이러한 MQW 전계흡수 광변조기 전달함수의 비선형성에 대하여 변조기의 입출력 특성을 다음과 같이 규정할 때, 변조기의 광출력의 세기는 광전계의 절대값을 제공한 값으로 길이가 L인

광변조기에 입사하는 빛의 크기와 통과한 빛의 크기의 관계는 식(2)와 같다.

$$P_{out} = P_i \exp(-\alpha \Gamma L) \quad (2)$$

$\alpha$ 는 변조기의 양자우물에서의 흡수계수,  $\Gamma$ 는 광구속계수,  $L$ 는 변조기의 길이이다. 변조기에서 출력되는 빛의 세기는 입력 광 크기에 소광비를 곱한 것으로 표현할 수 있으며, 이때 변조기의 출력을 좌우하는 변조기의 소광비는 변조기의 흡수계수와 광구속계수, 변조기의 길이에 의해 결정된다. 일반적으로 전계에 따른 흡수계수의 변화는 PIN접합부에서 바이어스 전압에 의한 전계분포가 균일하지 않게 되면, 흡수계수도 공간적인 분포를 갖게 된다. 이러한 현상은 P,N층의 불순물 농도가 충분히 높지 않을 경우에 발생하게 된다. 빛이 도파로를 진행할 때, 변조기 길이에 대해서 흡수에 의해 생성된 정공들이 적극을 통해 소멸하지 못해 쌓이게 되면, 적체된 정공들에 의해 생성된 전계가, 바이어스에 의한 전계를 가리는 정공적체현상(hole pile-up effect)에 의해 흡수계수를 변화시킬 수 있다. 하지만 불순물 농도가 충분히 높고, 입사광의 크기가 크지 않으면, 흡수계수는 공간적으로 상수화되며, 오직 바이어스에 의한 함수가 된다. 따라서 광구속계수의 변화를 야기하는 양자우물 개수와, 길이변화에 따른 광흡수량의 증가등은 바이어스에 대한 일정한 흡수계수와 함께 출력 소광비를 변화시키는 요인으로 작용하게되며, 광흡수의 증가는 입력 광에너지가 밴드갭 에너지에 가까워 질수록 큰 흡수량을 유발하므로, 밴드갭 파장과 입력 광파장의 에너지의 차이인 파장 detuning은 광 출력 소광비의 또다른 변수가 된다. 그러므로, 이러한 출력특성 관계를 통해서 변조기의 광출력 특성의 비선형성을 좌우하는 여러 요인들에 대한 모의실험을 진행하였다. 광출력을 좌우하는 MQW 전계흡수 변조기의 입력전압에 따른 흡수량과 광구속계수를 결정하는 양자우물의 개수, 변조기의 흡수량의 변화를 야기하는 변조기의 길이, 파장 detuning등이 MQW 전계흡수 변조기의 전달함수에 미치는 영향을 통해 이러한 변수들이 변조기의 선형성에 변화를 유발한다고 예측하였다.

일반적으로 전계흡수 변조기의 입력 바이어스전압에 따른 변조기의 harmonic distortion은 소신호 근사 방법에 있어서 전계흡수 변조기의 전달함수를 7차의 Taylor식으로 표현할 수 있으며 이러한 입력전압에

대한 출력은 다음과 같이 표현된다<sup>[4]</sup>.

$$P_{out} = \theta + L_2 \theta^2 + L_3 \theta^3 + L_4 \theta^4 + L_5 \theta^5 \dots \quad (3)$$

$P_{out}$ 은  $(P_{out} - P_{ave}) / (P_{ave})$  로서 정의되는 평균전력( $P_{ave}$ )와 전체전력( $P_{out}$ )이 관계된 정규화된 전달전력을 의미하며 각각의  $L_2, L_3, L_4 \dots$ 는 입력에 대한 2차, 3차의 비선형 출력계수를 의미한다.  $\theta$ 는  $(V - V_b) \frac{dP}{dV} |_{V=V_b}$  로 정의되는 Taylor식에서 전체 전압( $V$ )에 대한 바이어스 전압( $V_b$ )에서의 변조신호를 의미한다. 여기에서  $\frac{dP}{dV} |_{V=V_b}$ 는 바이어스 전압( $V_b$ )에 대한 광출력의 경사효율(slope efficiency)을 나타낸다.

선형성 분석을 위해 변조기의 바이어스 전압에 따른 전달함수의 비선형성을 야기하는 요인으로 예측한 흡수층의 양자우물 개수를 5, 7, 9개로 변화시키고 파장 detuning은 25meV, 30meV, 35meV로 변화시켰으며 광변조기의 길이는 100 $\mu$ m에서 200 $\mu$ m까지 변화시키면서 그 특성을 분석하였다. 광변조기의 선형성 분석을 위해 먼저 양자우물 개수, 파장 detuning 및 변조기 길이에 대하여 MQW 전계흡수 광변조기의 입력신호( $P_i$ )에 대한 출력신호( $P_{out}$ )의 전달함수(L-V curve)를 각각 구하였다. 이때 변조기의 출력신호는 식(4)과 같이 임의의 바이어스 전압에 대한 함수로서 근사화 될 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$P_{out} = P_0 \exp[-(V/V_0)^a] \quad (4)$$

$P_0$ 는 0V 바이어스에서의 출력,  $V_0$ 는 출력이  $P_0/e$ 될 때의 전압을 각각 나타내고 상수  $a$ 는 전달함수를 근사화하기 위한 값이다. 일반적으로 상수  $a$ 는 벌크물질 전계흡수 변조기에서는 1~2의 값을 가지며, MQW 전계흡수 변조기에서는 2~4의 값을 지닌다<sup>[5]</sup>. 이러한 근사식을 이용하여 InGaAsP/InGaAsP MQW 흡수층을 가진 deep ridge 구조의 광변조기에서 입력 바이어스에 따른 흡수계수의 변화를 통하여 얻은 광출력 데이터를 이용하여, 입력전압에 대한 광출력의 4차 다항식을 식(4)를 통해 근사화 하였다. 이때 근사화는 다음과 같은 과정을 통해 수행되었다. 각각의 변수에 대한 흡수계수의 변화에 대하여 광출력 데이터를 계산하여 얻어진 입력바이어스에 대한 출력특성곡선을 구하고, 이를 통한 정확한 근사화를 위해  $P_0/2$  되는 출력에 대한 입력전압  $V_{mean}$  값과

$V_0$ 에 대하여 식(4)를 이용하면,

$$\log(V_{mean}) - \log(V_0) = \frac{1}{a} [\log(a-1) - \log(a)] \quad (5)$$

의 관계를 얻을 수 있고, 식(5)를 만족하는 근사화 상수  $a$ 값은 수치해석 방법을 통하여 구하였다. 이때 근사화 상수  $a$ 값을 이용하면 광출력 전달함수를 근사화시킬 수 있다. 이와 같은 과정을 통하여 양자우물의 개수와 파장 detuning 및 변조기 길이에 대한 각각의 전달함수를 지수함수적으로 근사화시킴으로써 구조 변화에 대하여 전달함수의 변화를 관찰할 수 있다. 표1은 구조변수의 변화에 따른 근사화된 전달함수 변수를 정리한 것이다.

표 1. 구조변수 변화에 따른 근사화된 전달함수 변수의 변화

Table 1. A variation of the approximated transfer function [Eq.(4)] value

구조변화 변수	a	Po(mW)	Vo(V)	
양자우물 개수 * 25 meV 기준	5 well	3.279	0.019	2.961
	7 well	3.063	0.003	2.535
	9 well	3.059	0.001	2.488
detuning (Eg-hv)	25 meV	3.063	0.003	2.535
	30 meV	4.138	0.014	3.240
	* 7 well 기준 35 meV	3.138	0.031	3.180
길이 변화 * detuning = 25 meV * 7 well 기준	100 $\mu$ m	3.544	0.058	3.061
	120 $\mu$ m	3.397	0.033	2.954
	140 $\mu$ m	3.284	0.019	2.854
	160 $\mu$ m	3.162	0.011	2.745
	180 $\mu$ m	3.130	0.006	2.653
	200 $\mu$ m	3.063	0.003	2.535

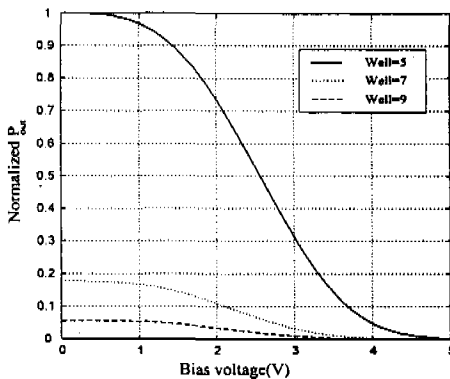


그림 1. 파장 detuning 25meV에서 양자우물 개수 변화에 대한 광출력 전달함수곡선

Fig. 1 Optical output transmission by varying the number of quantum well at 25meV wavelength detuning

그림 1은 파장 detuning이 25meV인 경우 양자우물

개수 변화에 대하여 식(4)에 의해 근사화된 전달함수를 나타낸 것이다. 양자우물의 개수가 증가함에 따라 흡수량과 광구수성 증가에 기인하여 변조기의 광출력( $P_{out}$ )이 작아짐을 알 수 있다. 이러한 각각의 구조변화에 따른 바이어스 전압에 대한 전달특성곡선을 통해서 경사효율 ( $\frac{dP}{dV}|_{V=V_0}$ )을 관찰할 수 있다. 전달함수의 일차미분 변화를 통해 그림 2와 같이 최적의 동작점을 선정할 수 있는데 이는 일차미분의 바이어스가 2차미분에서 0으로 되는 지점이며, second harmonic distortion에 해당하는 CSO가 상쇄되는 지점이다<sup>7)</sup>.

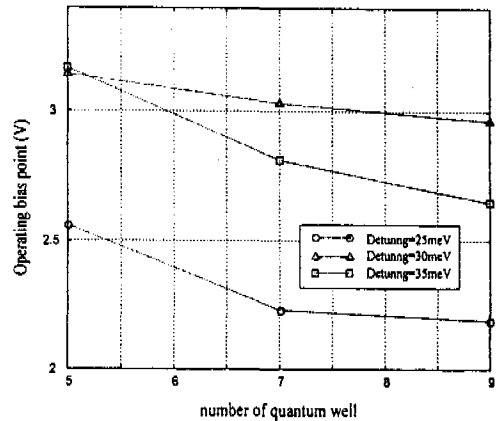


그림 2. 양자우물 개수와 파장 detuning변화에 대한 동작점의 변화

Fig. 2 The variation of operating bias voltage by varying the number of quantum well and wavelength detuning

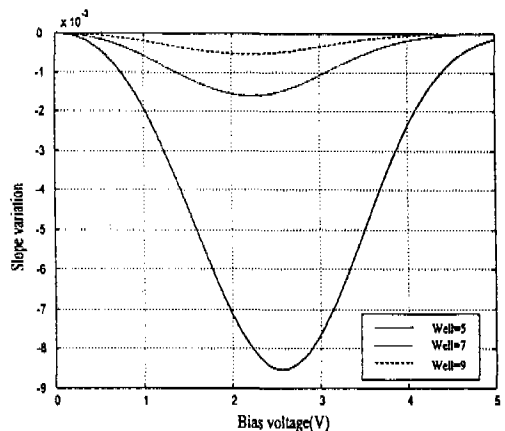


그림 3. 양자우물 개수변화에 대하여 파장 detuning이 25meV인 경우 전달함수의 기울기변화

Fig. 3 The slope variation of output transmission by varying the number of quantum well at 25meV wavelength detuning

그림 3은 25meV의 동작파장에 대한 양자우물의 개수의 변화에 따른 전달폭선의 바이어스전압에 대한 일차미분의 기울기 변화량을 보인 것이다. 이러한 결과를 통해 CSO를 상쇄시키는, 다시 말해 전달함수의 2차 미분값을 0으로하는 바이어스 지점을 예측할 수 있다.

그림 2와 그림 3에서 양자우물 개수와 파장 detuning변화에 대한 동작점 변화와 기울기 변화를 살펴보면, 양자우물 개수의 증가에 대하여 동작점이 작은 바이어스 쪽으로 천이함을 볼 수 있는데 이는 양자우물 수가 증가할수록 흡수가 바이어스에 대하여 증가하기 때문이다. 이러한 경향을 통해 양자우물 수가 증가함에 따라서 작은 구동전압을 갖게 됨을 볼 수 있었다. 또한 양자우물의 개수가 증가하였을 때 바이어스전압에 대한 전달함수 기울기의 변화량이 점점 작아짐을 볼 수 있는데, 이러한 결과로부터 양자우물 개수가 증가해감에 따라 동작점을 기준으로한 RF 신호 입력구간의 선형성이 향상됨을 예측할 수 있다. 한편 파장 detuning에 대한 전달함수의 기울기 변화를 그림 4에 나타내었다.

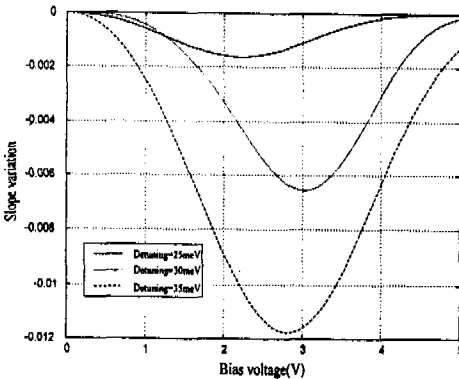


그림 4. 양자우물이 7개인 경우 파장 detuning변화에 대한 전달함수의 기울기변화

Fig. 4 The slope variation of output transmission function by varying a wavelength detuning with 7 quantum wells

이때 파장 detuning에 대한 전달함수의 기울기 변화는 7개의 양자우물개수를 기준으로 30meV와 35meV인 경우에 양자우물의 개수변화에 대한 기울기의 경향을 지니지 못함을 볼 수 있다. 즉, 동작 파장의 증가에 따른 CSO를 상쇄시킬 수 있는 동작 바이어스 전압의 변화가 동작 파장에 따라서 일정한 감소 또는 증가의 경향을 지니지 못하는데 이는 동작파장과 바이어스 전압에 대하여 흡수계수의 변화가 일정한 경향을 지니지 못하기 때문이다. 따라서

이때의 결과로는 두 파장 detuning의 절대적인 기울기 변화량을 가지고 선형특성에 대한 예측을 하기에 는 어려움이 있다.

### III. Intermodulation 특성분석

근사화된 전달함수를 이용하여 동작점에 대한 two-tone 입력신호에서 CSO(composite second-order distortion)와 CTB(composite triple beat distortion)값을 계산함으로써 양자우물 개수 변화에 대하여 전달함수 기울기 변화를 통하여 예측한 선형성을 확인하고 파장 detuning에 대한 선형특성에 대해서 분석하였다. CSO와 CTB의 계산은 식(2)와 식(3)을 이용하여 아래의 과정을 통해 유도하였으며, 본 과정은 참고문헌 5의 linear method를 적용하였다<sup>[5]</sup>. 식(4)에서, 단일 입력신호에 대한  $V$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = V_b [1 + m_0 \cos(\omega t)] \tag{6}$$

여기에서  $V_b$ 는 바이어스 전압이고,  $m_0$ 는 바이어스 전압에 대한 입력 신호의 크기를 나타내는 변조 깊이(modulation depth)로서 정의된다. 또한  $\omega$ 는 변조 각주파수를 나타낸다. 다중채널에서의 인접채널에 의한 intermodulation distortion을 알기 위해 two-tone 입력에 대한 CSO와 CTB를 다음과 같이 유도하였다. two-tone 입력시의 입력 신호는 아래와 같이 정의한다.

$$V_i = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t) \tag{7}$$

위의 (7)식을 식(3)에 대입하여 얻은 식과 식(4)의 Taylor 전개식을 통해서 얻은 각각의 계수를 비교하여 각각의 각각의 기준 신호에 대한 2차 비선형 출력의 크기를 비로 나타낸 것이 CSO이며, 3차 비선형 출력에 대한 기준신호 출력의 비를 CTB로 정의하였다. 이러한 과정을 통해서 얻은 CSO와 CTB는 다음과 같이 나타낸다<sup>[5]</sup>.

$$CSO = \left[ \frac{a(V_b/V_0)^{a-1} - (a-1)(V_b/V_0)^{-1} (m_0 V_b)}{2V_0} \right]^2 \tag{8}$$

$$CTB = \left[ (m_0 V_b)^2 \cdot \left\{ \frac{-a^2(V_b/V_0)^{2a-2} + 3a(a-1)(V_b/V_0)^{a-2}}{8V_0^2} - \frac{(a-1)(a-2)(V_b/V_0)^{-2}}{8V_0^2} \right\} \right]^2 \tag{9}$$

이때  $V_b$ 는 바이어스 전압으로 CSO가 최소로 될 때  $P_0/2$ 를 만족하는 동작점( $V_{meun}$ )이 된다.  $m_0$ 는 변조기의 변조깊이를 나타내는 상수이다.

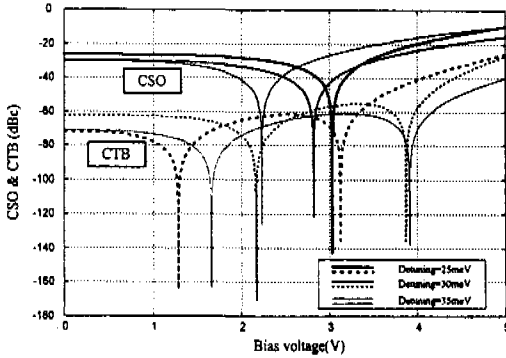


그림 5. 양자우물 개수가 7개인 경우 여러 파장 detuning에 대한 CSO와 CTB 변화

Fig. 5 The variations of CSO and CTB by varying a wavelength detuning with 7 quantum wells

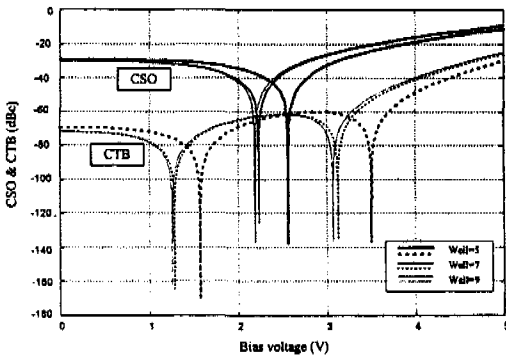


그림 6. 파장 detuning=25meV에서 양자우물 개수에 대한 CSO와 CTB 변화

Fig. 6 The variations of CSO and CTB by varying the number of quantum well at 25meV wavelength detuning

본 논문에서 CSO와 CTB의 모의 실험을 위해 적용한 변조깊이는 3%로 규정하였다. 이는 NTSC 방식의 주파수대역이 55MHz에서 535.25MHz 일 때 CATV 채널할당시 채널당 약 3%의 변조깊이에 대하여 77채널의 채널을 가질 때의 경우를 고려한 것이며, 일본의 42채널의 CATV 시스템의 주파수 할당에서의 각 채널당 변조깊이가 3%일때를 기준으로 계산된 결과를 보인 것이다<sup>[7][6]</sup>. 그림 5와 그림 6은 각각 양자우물 개수 변화와 파장 detuning 변화에 대하여 3%의 변조깊이를 기준으로 계산한 CSO와 CTB를 나타낸다. 그림 5에서 양자우물 개수변화에 대한 기울기 변화를 통해 예측된 동작점의 값에서 CSO값이

최소로 될 수 있으며, 양자우물의 개수가 증가할수록 CSO를 최소로 하는 dc 바이어스 동작점이 점차 작은 바이어스 전압으로 천이됨을 볼 수 있다. 동시에 입력 바이어스전압을 통해 CSO가 상쇄된 이후에 동작영역을 결정하는 CTB값의 경향을 볼 때, CTB 또한 작아짐을 볼 수 있으나 변화량은 각각 0.5V, 2dBc정도의 매우 작은 양이었다.

이와 같은 결과는 앞서 양자우물 개수에 대한 기울기 변화를 보고 우물개수 증가에 대하여 선형성이 향상된다는 예측을 뒷받침하기에는 부족하다. 그러나 미미한 변화이긴 하지만 우물개수 증가에 대하여 CTB값이 지속적으로 작아지는 경향을 보이고 있으며, 이는 동일한 파장 detuning인 경우 바이어스에 따른 흡수계수가 지속적으로 증가하는 경향에 기인한 결과로 예측된다. 또한 우물개수를 더 늘리거나 흡수계수의 변화가 매우 큰 흡수층을 사용하는 변조기의 특성을 이용한다면, 충분히 큰 CTB의 감소를 얻을 수 있으리라는 예상을 가능케 한다.

한편 파장 detuning에 대한 그림 6의 결과를 살펴 보면 파장 detuning이 25meV인 경우에 가장 우수한 선형성을 나타내고 35meV, 30meV의 순서로 우수한 선형성을 나타내었다. 이와 같이 파장 detuning에 대해서는 선형성이 일정한 경향을 지니지 못함을 알 수 있는데 이는 양자우물의 엑시톤(exciton)에 의해 흡수계수의 변화가 파장 detuning에 대하여 비선형적인 특성을 가지기 때문이다. 이때 CTB값의 변화를 살펴보면 양자우물의 경우와 마찬가지로 변화량은 매우 작다. 그러나 일반적으로 3%의 변조깊이를 가지는 NTSC방식의 CATV 시스템과 일본의 CATV 시스템에서의 요구되는 CTB의 값은 -60dBc이하의 값을 가져야 하는데<sup>[4]</sup>, 본 논문에서의 모의 실험결과에서는 이러한 CTB의 값이 모든 경우에 대하여 만족되는 결과를 보였다. 또한 CSO의 경우는 -20dBc의 높은 값을 지녔으나 전달함수의 굴곡점에 바이어스 전압을 인가하여 얻은 각각의 CSO값은 -100dBc이하의 값을 만족하였다.

이제 선형성 변화의 세 번째 요인으로서 변조기 길이변화에 대한 결과에 대하여 고찰한다. 파장 detuning을 25meV로 하고 양자우물의 개수는 7개로 고정시킨 다음 기울기 변화와 동작점 및 CTB값을 계산하였다.

그림 7은 길이 변화에 대하여 바이어스 전압에 대한 전달함수의 기울기 변화를 나타내는데 변조기 길이가 길어질수록 양자우물 개수변화에 대한 결과와

같은 경향을 지님을 알 수 있었다. 이는 양자우물 개수 증가에서와 마찬가지로 길이가 증가함에 따라 흡수량이 점점 증가하기 때문이며 경사효율(slope efficiency)이 최대가 되는 바이어스전압이 양자우물의 수의 증가에 따른 경향과 일치함을 볼 수 있었다.

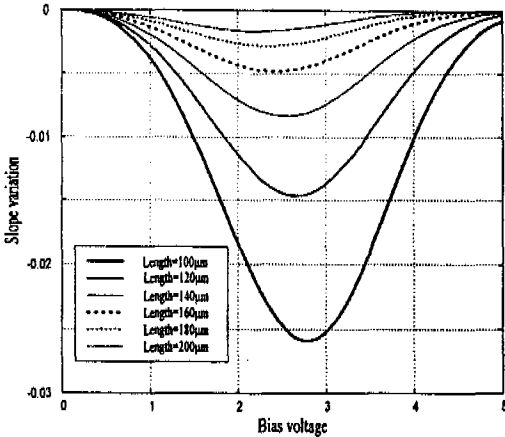


그림 7. 파장 detuning=25meV, 양자우물 개수가 7개인 경우 변조기 길이 변화에 대한 전달함수의 기울기 변화

Fig. 7 The slope variations of output transmission by varying a length of modulator at 25meV wavelength detuning with 7 quantum wells

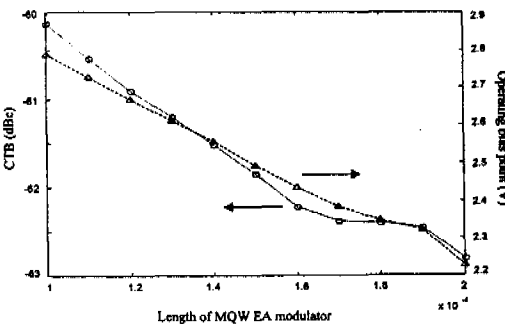


그림 8. 파장 detuning=25meV, 양자우물 개수가 7개인 경우 변조기 길이 변화에 대한 동작점과 CTB값의 변화

Fig. 8 The variations of operating bias voltage and CTB as a function of modulator's length at 25meV wavelength detuning with 7 quantum wells

그림 8은 길이변화에 대한 CTB값과 동작점 변화를 나타낸다. 이때의 결과를 살펴보면 양자우물 개수 변화에 대한 결과와 마찬가지로 전달함수의 2차 미분이 0으로 되고 CSO를 상쇄하는 동작바이어스의 변화가 작은 구동전압쪽으로 이동함을 알 수 있었으나 CTB값의 경향은 -60dBc 이하의 작은 값을 갖지

만 거의 변화가 없음을 볼 수 있었다. 그러나 변조기 길이의 증가는 흡수량의 증가를 의미하며, 이러한 흡수량의 변화는 광출력 전달함수에 영향을 줌을 알 수 있었다. 이때 각 변수의 변화에 따른 CTB값이 -60dBc 이하의 값에서 작은 변화를 보이는 이유는 그림 1에서의 바이어스 전압에 대한 출력특성곡선에서 보는 바와 같이 본 논문에 사용된 InGaAsP/InGaAsP MQW 광변조기의 바이어스 전압에서의 초기흡수가 매우 큰 값을 지니기 때문이다. 식(3), (4) 및 (8) 관계에서 알 수 있듯이 CSO를 상쇄시키는 바이어스 전압에 대한 two-tone 입력시, 바이어스 전압에 대한 CTB는 각 기준 신호 출력에 대한 3차 비선형 출력의 비로서 정의된다.

따라서 초기흡수에 의한 광출력이 작기 때문에 이에 따른 3차 비선형출력값 또한 상대적으로 작아짐을 유추할 수 있고, 변수들의 변화에 따른 영향이 전달함수에 영향을 주게됨을 CSO와 CTB의 변화를 통해서 알 수 있다. 그러나 초기흡수가 매우 크게 나타나는 본 논문의 InGaAsP/InGaAsP MQW 광변조기 구조에서는 분명한 CTB의 감소경향을 보기가 어려웠다.

#### IV. 결론

광대역 아날로그 SCM 광전송 시스템을 위한 InGaAsP/InGaAsP MQW 전계흡수 광변조기에서 입력 바이어스전압에 대한 전달특성곡선을 통하여 흡수층의 양자우물 개수와 파장 detuning, 변조기의 길이 변화에 대한 광변조기의 선형성 변화를 분석하였다. MQW 전계흡수 광변조기를 송신단에서 RF광 변환을 위해 사용할 경우, 변조기의 비선형 전달특성에 기인한 CSO와 CTB를 결정하는 변조기의 물리적인 요인의 변화를 통해서 각 변화요인에 대한 전달 특성곡선에서의 경사효율(slope efficiency)이 최적화 되는 동작점이 CSO를 상쇄시킴을 보였으며, 이러한 CSO를 상쇄시키는 동작 바이어스 전압이 양자우물의 수와 변조기의 길이 증가에 대하여 작은 동작 바이어스전압으로 천이함을 보였다. 그러나 전압 동작 영역을 결정하는 CTB값은 -60dBc 이하의 작은 값을 갖는데 반해 구조변화에 대해 수 dB의 차이만을 보일 뿐 큰 변화를 보이지는 않았다. 또한 파장 detuning에 대해서 CSO와 CTB의 변화가 일정한 경향을 보이지 않는데 이는 MQW 전계흡수 광변조기의 양자우물에서 엑시톤 효과에 의해 바이어스 전압에 따른 흡수계수의 변화가 비선형적인 특성에 기인

한 것이다.

이러한 결과로부터 MQW 전계흡수 광변조기의 비선형 요인에서 양자우물과 변조기의 길이는 CSO값에 영향을 주는 변수로서 작용함을 알았고, 파장 detuning은 MQW 전계흡수 광변조기의 고유한 흡수 계수의 변화 특성에 의하여 선형성의 변화에 일정한 경향을 유발시키지 않음을 확인하였다. 본 구조에서 CSO상쇄후의 CTB의 값은 -60dBc 이하의 작은 값을 가지며 크게 변화하지 않음을 알 수 있었는데, 이는 초기 흡수에 따른 작은 광출력 크기가 크게 감소하는 특징에 기인한 것으로 볼 수 있다. 따라서 변조기의 삽입손실을 최소화 하여 MQW 전계흡수 광변조기를 사용할 경우 CTB값이 상당히 커질 수 있다. 이러한 경우 CTB값에 의해 시스템의 동작영역이 크게 좌우되므로 CTB를 줄일 수 있는 변조기 구조를 설계하는 것이 매우 중요하다.

참 고 문 헌

[1] Robert Olshansky, "Optimal design of subcarrier multiplexed lightwave systems employing linearized external modulator," J. Lightwave Technol., vol. 10, No. 3, pp. 378-382, 1992.

[2] Takayuki Yamanaka and Koichi Wakita, "Field-induced broadening of optical absorption in InP-based quantum wells with strong and weak quantum confinement," Appl. Phys. Lett., vol. 65, No. 12, pp. 1540-1542, 1994.

[3] Gary E. Betts, L. M. Walpita and W. S. C. Chang, "On the Linear Dynamic Range of Integrated Electrooptical Modulator," J. Quantum electronics, vol. 22, No. 7, pp. 1009-1011, 1986.

[4] Gordon C. Wilson, Thomas H. Wood, M. Gans and J. L. Zyskind, "Predistortion of electroabsorption modulators for analog CATV systems at 1.55 $\mu$ m," J. Lightwave Technol., vol. 15, No. 9, pp. 1654-1662, 1997.

[5] Takanori Iwai, Kenji Sato and Ko-ichi Suto, "Reduction of dispersion-induced distortion in SCM transmission systems by using predistortion-linearized MQW EA modulators," J. Lightwave Technol., vol. 15, No. 2, pp. 169-178, 1997.

[6] G. C. Wilson, T. H. Wood, and J. L. Zyskind, "Analog transmission at 1.55 $\mu$ m using linearized

electroabsorption modulator/DFB laser fibre amplifier," Electronics Lett., vol. 31, No. 22, pp. 1934-1935, 1995.

[7] K. K. Loi, L. Shen, and H. H. Weider, "Electroabsorption Wave guide Modulators at 1.3 $\mu$ m Fabricated on GaAs Substrates," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 9, No. 9, pp. 1229-1231, 1997.



김 경 현(Kyun-hyun Kim) 정회원  
 1972년 8월 23일생.  
 1996년 8월 : 홍익대학교 전파공학과 졸업(공학사).  
 1998년 8월 : 연세대학교 대학원 전파공학과 졸업(공학석사)

1998년 8월~현재 연세대학교 전파통신연구소 연구원

<주관심분야> : 광소자, 광통신



이 규 웅(Gyu-woong Lee) 정회원  
 1971년 7월 9일생.  
 1998년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사).  
 1998년 3월~현재 : 대학원 기계전자공학부 재학중.  
 <주관심분야> : 유무선 통합통신망

을 위한 RF 광 변환소자 및 광통신 시스템

한 상 국(Sang-kook Han) 정 회원  
 현재 : 연세대학교 기계·전자공학부 조교수  
 논문지 제22권 제11호(1997년 1월) 참조