

論文97-34D-6-3

MQW 광변조기의 변조대역폭 확대를 위한 실장 기생 인덕턴스의 최적화

(Optimization of Parasitic Inductance for Maximizing the Modulation Bandwidth of MQW Modulators)

金炳南*, 李海英*

(Byoung-Nam Kim and Hai-Young Lee)

요 약

Multiple Quantum Well (MQW) 광변조기의 실장후 발생되는 기생성분 중 변조대역폭 확대에 이용할 수 있는 최적 기생 인덕턴스가 존재함을 확인하였다. 일반적으로 1.1 pF의 정전용량을 갖는 MQW 광변조기의 경우 변조대역폭을 최대화하는 최적 기생 인덕턴스를 종단에 연결되는 저항의 변화에 따라 계산하였다. 종단저항이 50 Ω 으로 연결된 MQW 광변조기의 기생 인덕턴스를 최적화하였을 경우, 기생 인덕턴스가 전혀 없을 때 계산된 대역폭에 비하여 45 % 이상 3-dB 대역폭이 개선될 수 있음을 관찰하였다. 본 연구에서 제안된 기생 인덕턴스 최적화방법은 모멘트법을 통해 기생 인덕턴스 영향의 정확한 해석이 가능하며, 이 기생 인덕턴스는 본딩와이어의 길이 및 본딩형태에 따라 조절이 가능함으로서 정확한 실제 구현이 가능하다.

Abstract

An optimum parasitic inductance is observed for maximizing the modulation bandwidth of the multiple quantum well (MQW) electro-absorption optical modulator. For 1.1 pF device capacitance of the current MQW optical modulator, the optimum parasitic inductances for maximum bandwidth are calculated for different terminating resistors. In case of 50 Ω terminating resistor, the 3-dB modulation bandwidth can be increased 45 % wider by using the optimum parasitic inductance than nothing parasitic inductance. This calculated optimum inductance can be practically implemented, since the parasitic inductance of bondwires can be accurately analyzed using the method of moments(MoM) and controlled by changing the length and shape of bondwires.

I. 서 론

최근 고속, 대용량 정보화 추세에 따라 광대역 정보 통신의 일환으로 초고속 정보통신망을 위한 광통신에

대한 관심이 고조되고 있다. 이를 위하여 국내에서는 2.5 Gbps급 송수신 모듈이 이미 개발되었으며 10 Gbps급 모듈의 연구가 국내 연구기관 및 기업에서 진행되고 있다.

* 正會員, 亞洲大學校 電氣電子工學部

(School of Electrical and Electronics Engineering, Ajou University)

※ 이 연구는 95년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임 (과제 번호 : 95-0100-05-01-3)

接受日字:1997年1月27日, 수정완료일:1997年6月3日

10 Gbps 이상의 광변조 방법은 크게 직접변조 방법과 외부변조 방법으로 분류된다. 레이저 다이오드의 주입 전류를 변조시키는 직접변조 방법은 레이저 다이오드의 공진 주파수에 의하여 고유의 광잡음이 존재하고 [1] 광신호를 왜곡시킬 정도로 처광량이 크므로, 광대역 변조에 불리하다. [2] 반면에 외부 광변조 방법은 레

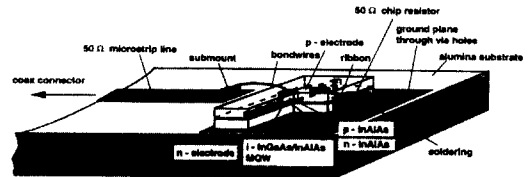
이저 다이오드 공진기 밖에 광변조기를 놓음으로써 안정적이며 고속의 광변조가 가능하도록 하는 것이다. 이 외부 광변조기는 크게 LiNbO₃를 이용한 분산형 변조기와 반도체 MQW를 이용한 흡수형 변조기가 있다. 반도체 MQW 변조기는 레이저 다이오드와 함께 단일 기판에서 성장이 가능하며, 그 변조 속도와 변조 전력 이 LiNbO₃ 변조기와 대등하여 많은 연구 개발이 진행되고 있다.

그러나, 10 Gbps 이상의 광변조 모듈은 사용되는 이들 소자의 주파수 대역보다는 주변회로 및 실장구조에 의하여 변조대역폭이 주로 결정될 수 있다. 이는 변조 소자는 매우 작은 평면소자이고 구동회로와의 연결선은 동축선이므로 이들 신호선간의 구조적 불연속으로 발생하는 여러 종류의 불필요한 기생성분 때문에 발생된다. 이러한 광변조기의 실장 기생성분은 용량성 기생성분과 유도성 기생성분으로 나눌 수 있는데, MQW 광변조기의 내부 임피던스는 매우 크며 그 내부 정전용량이 다른 용량성 기생성분보다 크므로, 병렬 용량 기생성분보다 직렬 유도 기생성분에 의하여 주파수 변조 특성이 주요하게 영향을 받는다.

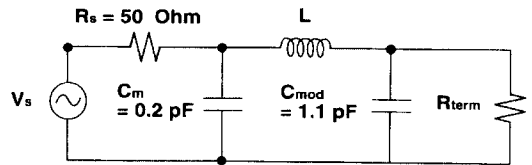
한편 직접변조 방식의 레이저다이오드의 경우 내부 임피던스가 매우 작으므로 대역폭 확대를 위하여 이러한 직렬 유도성 기생성분을 최소화하는 것이 중요하며 다중 본딩이나 리본 본딩등이 이용된다.^[3] 그러나, MQW의 광변조기의 경우 높은 내부 정전용량이 대역폭을 제한하므로, 소자 자체의 구조적 변경으로 내부 정전용량을 낮추거나, 종단저항을 연결하여 대역폭을 넓히는 방법이 이용되어 왔다^[4]. 반면에, 유도성 기생성분의 효과는 광변조기의 경우 일반적으로 무시되어 왔으나, 이 유도성 기생성분이 변조기의 내부 정전용량을 보상하여 변조 대역폭 확대를 기대할 수 있다.

본 논문에서는 실장된 MQW 광변조기의 변조대역폭 확대를 위한 최적 기생 인덕턴스가 존재함을 대표적 광변조기 구조의 기생성분 해석으로부터 확인하였으며, 여러 종단저항에 대하여 최적 기생 인덕턴스를 계산하였다. 또한 광변조기의 종단에 병렬로 연결되는 종단저항은 대역폭 증대에 기여를 하나 변조기에 공급되는 변조 전압의 감소 및 구동전력 소모를 초래하게 되므로, 이에 대한 power penalty를 계산하였다. 등가 내부 용량이 1.1 pF인 MQW 광변조기에 50 Ω 종단저항을 연결한 경우, 0.8 nH의 최적 기생 인덕턴스를 이용하여 기생인덕턴스 성분이 전혀 없는 경우 및 매

우 많은 경우에 비하여 대역폭이 45 %이상 확대됨을 확인하였다. 본 해석 결과는 MQW 광변조기의 실장시 기생 인덕턴스와 종단저항을 최적화하여 변조대역폭을 최대화할 수 있는 실장 구조 설계에 효과적으로 이용될 수 있다.



(a)



$$L = L_{\text{bondwire}} + L_{\text{electrode}} + L_{\text{ribbon}}$$

(b)

그림 1. (a) 대표적인 MQW 광변조기 구조도, 1(b) 등가회로

Fig. 1. (a) MQW optical modulator structure, (b) Equivalent circuit.

II. 실장 구조 및 해석 방법

1. 대표적 MQW 광변조기의 실장 구조

그림 1(a)는 대표적인 광변조기의 실장구조로서^[5] 평면구조의 광변조기 전극을 50 Ω 특성임피던스를 갖는 평면구조의 마이크로 스트립 한쪽 끝에 본딩하며 마이크로 스트립의 다른 한쪽 끝은 동축선용 커넥터에 납땜으로 연결한다. 임피던스 정합용 저항은 마이크로 스트립 기판상에 thin flim 저항이나 chip 저항을 이용하여 형성하거나 광변조기 chip상에 Deposition이나 Doping으로 형성할 수 있으나, 변조속도의 증대를 위하여는 변조기상에 형성하는 것이 유리하다. 그림 1(a)에서는 50 Ω 칩저항을 사용하여 한쪽끝은 리본을 통해 광변조기의 p-전극에 연결되며 다른 한쪽은 광변조기의 n-전극과 함께 여러개의 via holes 를 통하여 마이크로 스트립의 접지판에 연결된다. 여기서 사용될 수 있는 본딩 방법은 와이어 본딩, 리본 본딩 등이 이용될 수 있으나, 최적 기생인덕턴스를 구현하기 위해서는 다

중 와이어 본딩이 정확성이 높으며 부분적인 tuning이 가능하다. Submount는 본딩단차를 줄이고 고주파에서 전류불연속 효과를 감소시키기 위하여 사용된다. 그림 1(b)는 실장 기생 성분이 포함된 등가회로로서 R_s , C_m , L , C_{mod} , 그리고 R_{term} 은 각각 구동전원 내부저항, 마운트에 의한 기생 용량, 본딩와이어와 전극 및 리본의 기생 인덕턴스, 변조기의 등가용량 및 종단저항을 의미한다. 구동전원의 내부저항은 전압구동 효율과 대역폭이 넓은 50 Ω 으로 가정하였다.^[6] 일반적으로 MQW 변조기는 정전 용량과 수 Ω 이하의 내부저항으로 등가된다.^[7] 그러나 이 내부저항은 변조기의 정전용량에 비해 매우 작으므로 이 저항에 의한 효과는 무시하였다.^[7] 마이크로스트립 전송선의 불연속 및 마운트에 의한 기생 커패시턴스 성분(C_m)은 0.2 pF으로 대표적 광변조기의 내부 정전용량(1.1 pF)에 비하여 상대적으로 매우 작은 값을 갖는다.^[7] 기생 인덕턴스(L)는 크게 본딩와이어에 의한 성분과 변조기의 전극에 의한 성분 및 리본에 의한 성분으로 구성되나, 전극의 인덕턴스는 본딩와이어에 비하여 상대적으로 매우 작으므로 무시할 수 있다.^[8] 또한 짧은 거리로 연결되는 리본에서 발생하는 기생 인덕턴스 성분은 본딩와이어에서 발생하는 기생 효과보다 매우 작으므로 실장후 발생하는 기생 인덕턴스 성분은 본딩와이어에 의한 영향이 주효하다. 그러므로, MQW 광변조기의 변조대역폭은 주로 변조기의 정전 용량, 기생 인덕턴스, 종단저항에 의해 결정된다.

2. 해석방법

모멘트법(MoM)에 의한 본딩와이어의 기생인덕턴스 계산 결과를 이용하여 본딩와이어의 변화에 따른 MQW 광변조기의 주파수 응답 특성을 SPICE 시뮬레이션을 이용하여 계산하였다. 소자와 외부로 연결하는 리드 스트립간의 연결선으로 가장 많이 쓰이고 있는 본딩와이어는 주파수가 증가함에 따라 기생적으로 인덕턴스 성분이 주요하게 발생되며, 이 기생 인덕턴스 성분은 내부 정전이 주요한 MQW 광변조기 내부의 정전용량을 보상하는 역할을 한다. 대표적인 MQW 광변조기의 실장구조인 그림 1(b)에 모멘트법을 통해 계산된 본딩와이어의 기생 인덕턴스 값을 삽입 후, 그 값을 가변하면서 광변조기의 최대 변조대역을 얻는 최적 기생 인덕턴스 값을 계산하였다.

또한, 병렬로 연결된 종단저항은 변조기의 정전용량

과 본딩와이어의 기생 인덕턴스에 의해 발생하는 공진 특성에 영향을 미치므로 종단저항의 변화에 따른 최적 기생 인덕턴스 값을 계산하였다. 종단저항의 크기가 25 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 그리고 ∞ 인 경우에 대하여 본딩와이어의 기생 인덕턴스 성분이 전혀 존재하지 않을 때부터 5 nH 의 범위까지 기생 인덕턴스를 가변하면서 최대 변조 대역을 얻는 최적값을 구하였다. 기생 인덕턴스 성분은 본딩와이어의 반경 및 길이에 따라 변화하기 때문에 본 논문에서는 일반적으로 가장 많이 쓰이는 재질인 직경 25 μm 의 금와이어의 경우에 대하여 모멘트법을 이용하여 길이에 따른 변화를 계산하였다.

그리고, MQW 광변조기의 내부 정전용량의 크기는 변조기의 변조 대역 결정에 가장 큰 영향을 끼치므로 변조기의 정전용량에 따른 광대역 변조 특성도 해석하였다. 변조기의 정전 용량을 대표적인 값인 1.1 pF 를 중심으로 0.7 ~ 1.3 pF 의 범위내에서 가변시키면서 종단저항이 25 Ω , 50 Ω , 그리고 100 Ω 의 각각의 경우에 대하여 전기적 신호의 최대 차단 주파수 (-3 dB frequency) 를 계산하였다.

또한, 변조기의 종단에 연결된 병렬저항은 기생 성분의 영향이 무시되는 저주파 영역에서의 응답특성을 제한하므로 종단저항에 따른 저주파 응답특성을 해석하였다. 종단저항의 값이 작을 수록 공진특성에 의한 Quality factor 값의 감소로 대역폭이 증가하여 광대역 변조특성에는 유리하나, 저주파 영역에서 구동회로의 내부 임피던스에 의한 전압강하가 증가하여 구동효율이 감소한다.^[4] 그러므로 이러한 종단저항의 연결에 따른 전력의 부가적인 손실을 다음의 power penalty(P_p) 식을 통하여 정량적으로 해석하였다^[9].

$$P_p = 20 \log \left(\frac{V_{R_{tm}}}{V_{\infty}} \right) \text{ (dB)} \quad (1)$$

여기서 V_{∞} 는 종단저항이 개방된 경우의 구동전압이며, $V_{R_{tm}}$ 은 변조기에 종단저항이 연결되었을 때의 직류광 변조 출력이 종단저항이 개방되었을 때와 동일한 출력을 얻기 위하여 사용된 구동전압을 나타낸다. 위 식에서 P_p 가 증가할 수록 구동회로에서의 부가적인 전력 손실 증가를 의미한다.

III. 해석 결과

그림 2는 SPICE를 이용하여 계산된 MQW 광변조

기의 실장 기생 인덕턴스 변화에 따른 변조기의 정규화된 주파수 응답 특성 (normalized frequency response) 을 나타낸다. 그림 1 (b)의 등가회로에서 모멘트법으로 계산된 기생 인덕턴스 값을 0.4 ~ 1.2 nH로 모의실험하였다. 그림 2에서 정규화된 주파수 응답 특성은 실장 기생성분이 관찰되지 않는 저주파 응답 특성으로 정규화한 값을 의미한다. 1.1 pF의 정전용량으로 등가되는 변조기의 종단에 50 Ω 저항을 연결하였을 경우, 0.8 nH에서 변조기의 변조대역폭이 최대가 됨을 관찰하였다. 레이저다이오드의 경우 내부 임피던스가 매우 작으므로 대역폭 확대를 기대하기 위해서는 기생 인덕턴스 성분을 최소화하여야 되나, MQW 광변조기는 대역폭을 제한하는 내부의 용량성 성분을 보상하는 최적 기생 인덕턴스 값에서 변조 대역폭이 최대가 된다.

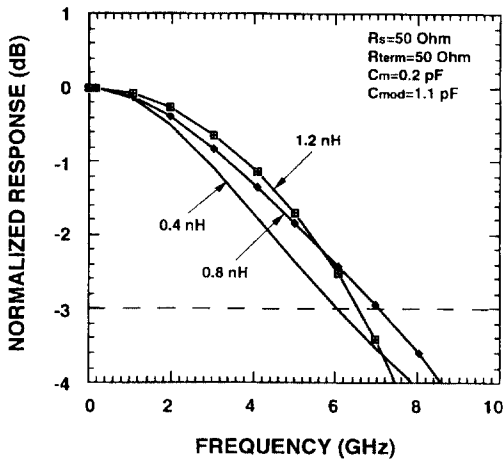


그림 2. 정규화된 주파수 응답 특성
Fig. 2. Normalized frequency response.

광변조기의 종단저항이 변화할 때 최대 차단주파수를 갖도록 하는 최적 기생 인덕턴스 및 본딩와이어의 길이에 따른 기생 인덕턴스를 계산하여 그림 3에 나타내었다. 그림 1 (b)의 등가회로에서 종단저항을 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω로 변화시키면서 최적 기생 인덕턴스 값을 계산한 결과, 각각 0.45 nH, 0.8 nH, 1.2 nH에서 차단 주파수가 최대가 된다. 각 최적 기생 인덕턴스 값에서 최대 3-dB 대역폭은 12 GHz, 7.1 GHz, 5.5 GHz로 기생 인덕턴스 성분이 존재하지 않는 경우에 비해서 3-dB 대역폭이 각각 4.7 GHz (64 %), 2.2 GHz (45 %), 1.8 GHz (50 %)의 증가를 관찰 할 수

있다.

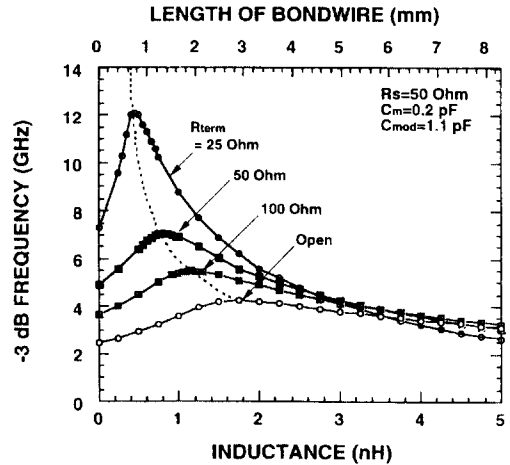


그림 3. 종단저항의 변화에 따른 최적 기생 인덕턴스
Fig. 3. Optimum parasitic inductance with terminating resistors.

이러한 결과로부터 변조기와 병렬로 연결된 종단저항의 크기가 증가할 수록 보상효과를 위하여 필요한 효과적인 기생 인덕턴스가 증가하여야 함을 확인하였다. 또한, 변조기의 종단이 개방되었을 경우($R_{term} = \infty$)와 종단저항이 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω으로 각각 연결되었을 경우, 각각의 최적 기생 인덕턴스 값을 이용하여 계산된 최대 차단주파수를 비교하면 각각 7.9 GHz, 2.8 GHz, 1.3 GHz의 변조대역폭 증가를 관찰하였다. 종단저항은 변조대역폭 확대를 위하여 변조기에 일반적으로 연결되나, 이 종단저항에 의한 변조대역폭 증가 효과는 기생 인덕턴스가 최적화된 상태에서 가장 현저함을 확인하였다. 이 기생 인덕턴스는 주로 MQW 광변조기 소자와 마이크로스트립 등의 신호 전송선의 연결선으로 사용되는 본딩와이어에 기인하므로 최적 기생 인덕턴스를 얻기 위한 본딩와이어의 길이 및 기판으로부터의 높이 등 본딩 구조의 정량적인 해석이 필요하다. 따라서, 모멘트법을 이용하여 본딩와이어를 광대역 임피던스 해석한 결과, 본딩와이어의 기생 인덕턴스는 와이어 길이에 의해 가장 우세한 영향을 받게 된다. 종단저항이 작을 수록 최적 기생 인덕턴스는 감소하므로 짧은 길이의 본딩와이어가 필요함을 확인하였다. 그러나, 그림 3에서 살펴볼 수 있듯이 기존의 고속 소자의 실장에 사용되어온 실장 기생 인덕턴스의 최소화 방법

은 오히려 광변조기의 변조대역폭을 감소시키게 된다. 그러므로 고속 광변조기의 실장은 리본본딩 등을 사용 하므로서 기생 인덕턴스를 최소화하는 방법보다는 종 단저항에 따른 최적 기생 인덕턴스를 계산하여 적절한 길이로 와이어 본딩을 하는 것이 변조 특성 개선에 유리함을 확인할 수 있다. 그림 3에서 최대 차단주파수는 최적 기생 인덕턴스 값을 중심으로 약 8 ~ 10 % 범 위내에서 큰 변화폭이 관찰되지 않으므로 실제 소자의 와이어 본딩에 용이하게 사용될 수 있다. 그러므로, 본딩와이어의 기생 인덕턴스는 와이어의 길이 및 다중 연결 등 그 접속 방법에 따라 0.2 ~ 2 nH 범위에서 광범위하게 조절이 가능하므로, 변조기의 용량성 성분을 적절히 보상할 수 있는 최적 기생 인덕턴스의 구현이 용이하다. 따라서, 본 논문에서 제안된 최적 기생 인덕턴스를 이용하는 방법은 광변조기에 전기적 신호를 공급하는 본딩와이어의 본딩방법을 최적화하는 방안으로 구현이 용이할 뿐 아니라 그 구조가 매우 단순하다. 또한 이 방법은 광변조기 모듈내 다른 추가적인 공정을 필요로 하지 않으므로 경제적인 측면에서 매우 유리하다.

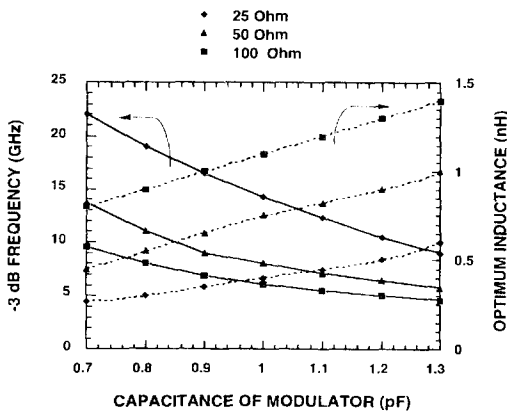


그림 4. 광변조기의 커패시턴스의 변화에 따른 최대 변조대역폭과 최적 기생 인덕턴스
 Fig. 4. Maximum modulation bandwidth and optimum parasitic inductance with modulator capacitances.

그림 4는 광변조기의 등가 정전용량의 변화에 따른 최적 기생 인덕턴스와 광변조기의 최대 변조대역폭을 나타내고 있다. 광변조기의 등가 정전용량 성분의 크기가 증가함에 따라 최적 기생 인덕턴스 값도 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 정전용량의 크기가 증가할수록

그 증가된 성분을 보상하기 위한 기생 인덕턴스에 의한 자기에너지도 증가하기 때문이다. MQW 광변조기의 속도에 가장 우세한 영향을 미치는 요인으로서 변조기 내부의 등가 용량성 성분의 크기가 작을 수록 그에 따른 시상수가 감소하므로 고속 동작 및 광대역 특성에 유리하게 된다. 따라서, 광변조기의 등가용량이 작을 수록 차단 주파수가 증가하여 고속동작 및 변조 특성의 광대역화에 유리함을 알 수 있다. 변조기의 등가 용량성 성분을 감소시키기 위한 일차적인 방법은 변조소자의 변조영역 및 소자의 크기를 감소시키는 방법이 있으나, 소자의 크기 감소는 실제 제작 및 실장 공정 과정상 생산비용의 증가 및 생산기술의 한계로 인하여 비현실적이다. 그러므로 본딩와이어의 구조변경을 통한 기생 인덕턴스의 조절방법은 소자의 크기를 동일하게 유지하면서 변조대역폭을 최대화할 수 있으므로 기존의 공정을 그대로 이용할 수 있는 장점이 있다.

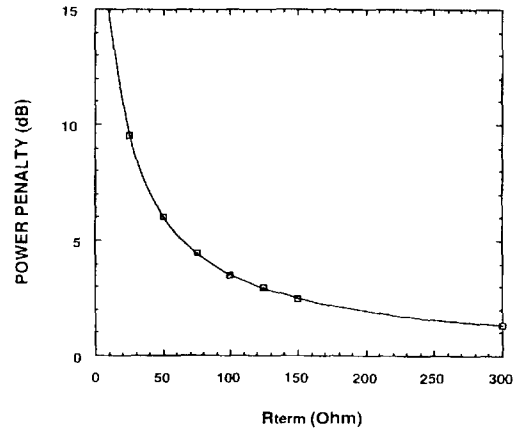


그림 5. 종단저항의 변화에 따른 power penalty
 Fig. 5. Power penalty with terminating resistors.

종단저항의 연결에 따른 저주파 영역에서의 변조기에 대한 공급 전력의 감소를 식 (1)의 power penalty를 이용하여 그림 5에 나타내었다. 종단저항이 각각 25 Ω, 50 Ω, 100 Ω으로 연결되는 경우 종단저항을 연결하지 않았을 경우보다 약 9.5 dB, 6 dB, 3.8 dB의 power pwnalty를 가진다. 이는 종단저항의 연결로 인하여 변조기의 변조대역폭은 증가하게 되지만 저주파 영역에서는 변조기에 공급되는 전력의 크기가 감소하게 된다. 전계흡수형 MQW 광변조기는 레이저다이오

드에서 출력되는 광신호를 변조하는데 광변조기에 인가되는 전압에 의한 전계흡수효과로 광신호를 변조하게 된다. 이 전압은 저주파수 영역에서는 전원저항과 종단저항 성분에 의해서만 결정되며, 전원전압은 종단저항의 크기에 비례하여 광변조기에 공급된다. 그러므로 종단저항의 크기가 작을수록 저주파 영역에서의 변조기의 전계흡수 특성이 열화되며 이를 보상하기 위한 전원전압의 증가가 불가피하다. 변조대역폭과 power penalty를 모두 고려할 때 50 Ω 의 종단저항이 가장 우수한 특성을 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 실장된 MQW 광변조기의 변조대역폭 확대를 위한 최적 기생 인덕턴스가 존재함을 대표적 광변조기 구조의 기생성분 해석으로부터 확인하였으며, 여러 종단저항에 대하여 최적 기생 인덕턴스를 계산하였다. 또한 광변조기의 종단에 병렬로 연결되는 종단저항은 대역폭 증대에 기여를 하나 변조기에 공급되는 변조 전압의 감소 및 구동전력 소모를 초래하게 되므로, 이에 대한 power penalty를 계산하였다. 등가 내부 용량이 1.1 pF인 MQW 광변조기에 50 Ω 종단저항을 연결한 경우, 0.8 nH의 최적 기생 인덕턴스를 이용하여 기생 인덕턴스 성분이 전혀 없는 경우 및 매우 많은 경우에 비하여 대역폭이 45 %이상 확대됨을 확인하였다. 본 해석 결과는 MQW 광변조기의 실장시 기생 인덕턴스와 종단저항을 최적화하여 변조대역폭을 최대화할 수 있는 실장구조 설계에 효과적으로 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] W. S. C. Chang, "High-Efficiency 1.3 μm InAsP-GaInP MQW Electro-absorption

Waveguide Modulators," *IEEE Photonics Technology Letters*, May 1996.

- [2] Rodney S. Tucker, "High-speed Modulation of Semiconductor Lasers," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. LT-3, pp. 1180, 1985.
- [3] 윤상기, 한영수, 김상배, 이해영, "실장된 반도체 레이저의 본딩와이어를 고려한 광대역 변조 특성 해석," *대한전자공학회지*, 제33권, A편, 제2호, pp. 148-154, 1996년 2월
- [4] S. H. Lin, and Shin-yuan Wang "High-throughput GaAs PIN electro-optic modulator with a 3-dB bandwidth of 9.6 GHz at 1.3 μm ," *Applied Optics*, vol. 26, no. 9, pp 1696-1700, May 1987.
- [5] T. Ido, H. Sano, M. Suzuki, S. Tanaka, and H. Inoue, "High-Speed MQW Electro-absorption Optical Modulators Integrated with Low-Loss Waveguides," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 2, pp 170-172, February 1995.
- [6] G. C. Wilson, T. H. Wood, and U. Koren, "Integrated Electro-absorption Modulator/DBR Laser Linearized by RF Current Modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 10, pp 1154-1156, October 1995.
- [7] T. H. Wood, "Multiple Quantum Well (MQW) Waveguide Modulators," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 743-757, June 1988.
- [8] R. A. Becker, "Multigigahertz Lumped-Element Electro-optic Modulators," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-21, no. 8, pp. 1144-1146, August 1985.
- [9] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication System*, JONE WILEY & SONS, INC. 1992

— 저 자 소 개 —



金炳南(正會員)

1996년 아주대학교 전자공학과 졸업
(공학사). 1996년 ~ 현재, 아주대학
교 대학원 전자공학과 석사과정 재학
중. 주관심 분야는 고속 광전소자의
전기적 실장구조의 최적 설계 및 측
정, 초고속/고밀도 반도체 소자의 실

장 및 최적 설계 등임.

李海英(正會員) 第33卷 A編 第7號 參照

현재 아주대학교 전자공학과 부교수.