

1.55 μm용 진행파형 전계 흡수 광 변조기의 마이크로파 특성분석 과 제작

옥 성해, 구 민주, 최 영완
광전자 및 광통신 연구실, 중앙대학교

Fabrication and analysis of traveling-wave electroabsorption modulator for 1.55 μm operation

Seong-Hae Ok, Min-Ju Koo, Young-Wan Choi
Lab. of optoelectronics and optical communication, Chung-Ang University

Abstract - 본 논문에서는 진행파형 전계 흡수 광 변조기를 3차원 FDTD를 이용하여 도파관의 폭과 진성영역의 두께 그리고 N-도핑층의 도핑수준을 변화시키면서 최적화된 구조를 설계하였다. 제작된 소자의 구조는 진성영역의 두께는 0.9 μm, 도파관의 폭은 6 μm이며 전체 소자의 길이는 700 μm 이다. 제작된 소자의 마이크로파 특성을 측정하였으며 마이크로파 특성과 광 특성을 사용하여 주파수 응답특성을 추정하였다. 소자의 길이가 400 μm 일 때 17.8 GHz의 주파수 응답특성을 얻었다. .

1. 서 론

오늘날의 통신은 점점 초고속 대용량으로 가는 추세에 있으며, 그에 따른 광의 역할과 영역 또한 넓어지고 있다. 근래에 초고속 통신망으로써 새롭게 등장한 Microwave-Photonics는 광과 무선이 결합한 유무선 통합형 통신 형태으로써 일정 거점까지는 광으로 전송하고 그 이후 최종 끝 단까지는 무선으로 통신하는 구조를 가지고 있다. 진행파형 전계 흡수 광 변조기는 우수한 소광비와 낮은 전력 소모와 넓은 대역폭을 확보할 수 있으므로, 광통신뿐만 아니라 Microwave-Photonics 시스템에도 매우 적합한 소자로서 근래에 활발한 연구가 진행되어지고 있다 [1-2]. 진행파형 전계 흡수 광 변조기의 대역폭을 최대한 확보하기 위해서는 진행하는 마이크로파의 위상 속도와 광파의 그룹속도가 정확히 정합 되어야 하고 소자의 임피던스가 정합 되어야 한다. 리지 형의 진행파형 광 변조기는 등가회로를 이용하여 분석하기에 어려움이 있는 복잡한 구조를 갖고 있으므로 정확한 분석을 위해서는 수치해석 방법을 사용하여야 한다. FDTD에 의한 수치해석은 구조의 모델링이 쉽고, 복잡한 구조도 쉽게 분석 할 수 있으며, 시간 영역에서의 마이크로파의 진행상태를 보여줄 뿐만 아니라 간단한 푸리에 변환에 의한 주파수 응답도 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 광 변조기의 구조를 변화시키면서 전계와 자계의 분포를 구하여 마이크로파의 특성과 구조와의 관계를 분석하여 설계하였다. 반도체 공정을 이용하여 광도파로 및 진행파형 전극을 제작하였다. 진행파형 전계 흡수 광변조기의 S 파라미터를 측정하였고 측정된 S 파라미터로부터 마이크로파 특성을 추출하였으며 추출된 마이크로파 특성으로부터 Optical Response를 계산하였다.

2. 마이크로파 특성 분석

2.1 FDTD

FDTD 알고리즘은 미분형 Maxwell 방정식을 시간과 공간 영역에 이산화 시키는 근사 방법으로 full-wave 해석이 가능하다. full-wave 해석은 표면파 효과, 복사 파, 외부 소자와 결합 효과를 고려하여 계산할 수 있으며 임의의 소자 형태, 다양한 급전 구조, 다층 구조, 비 등방성 유전체의 경우에도 해석이 가능하다. 본 논문에서는 Yee^[3]의 방법에 기초하여 시간적 변화를 갖는 Maxwell 방정식을 유한 차분 방정식으로 시간과 공간에 대하여 근사 시키는 3 차원 FDTD를 이용하여 광 파와 마이크로파의 위상 속도 정합을 만족시키는 진행파형 전계 흡수 광 변조기를 설계하였다. 마이크로파 전송 특성의 분석을 위하여 모의실험에서는 0의 두께를 갖는 손실이 없는 전극 구조를 가정하였다. 비록 이와 같은 가정은 두꺼운 전극과 ridge 구조에 기인한 공기 중으로의 마이크로파 에너지의 유출에 기인하여 실제의 것보다 약간 더 큰 마이크로파의 유효 굴절률을 초래할 수 있으나 그 차이는 미미하다. 시간 영역에서 계산된 FDTD 데이터는 푸리에 변환에 의하여 주파수 영역에서의 데이터를 구할 수 있다. 주파수영역 분석에 사용된 수식은 다음과 같다.

$$\gamma(\omega, z_i) = \frac{1}{2z_i} \ln \frac{\sqrt{\frac{V(\omega, z_i)}{I(\omega, z_i)}_o} + \sqrt{\frac{V(\omega, z_i)}{I(\omega, z_i)}_s}}{\sqrt{\frac{V(\omega, z_i)}{I(\omega, z_i)}_o} - \sqrt{\frac{V(\omega, z_i)}{I(\omega, z_i)}_s}} \quad (1)$$

$$Z(\omega, z_i) = \sqrt{\frac{V(\omega, z_i)}{I(\omega, z_i)}_o} \cdot \sqrt{\frac{V(\omega, z_i)}{I(\omega, z_i)}_s} \quad (2)$$

여기서 $V(\omega, z_i)$ 와 $Z(\omega, z_i)$ 는 $z = z_i$ 일 때 전파상수와 특성 임피던스 이고 첨자 o와 s는 각각 개방과 단락을 의미한다. 계산에 사용된 진행파형 전계 흡수 광변조기의 에피 웨이퍼와 수직 구조는 그림 1과 그림 2와 같다. 진성영역의 폭과 두께는 각각 6 μm, 0.9 μm이며, 신호전극과 접지전극 사이의 간격은 6 μm 이다. P+층과 P층은 InP로 구성되며 두께는 각각 0.3 μm, 0.6 μm이다. 진성영역의 core층은 InGaAsP (1.48Q) 이고 두께는 0.3 μm 이다. N층은 InP와 InGaAsP (1.3Q)로 구성되며 두께는 각각 0.5 μm, 0.3 μm 이다. 그림 3은 그림 2의 구조

에서 진성영역의 폭을 6 μm 부터 2 μm 까지 감소시켰을 때 특성임피던스의 실수부분을 보여준다. 진성영역의 폭이 감소함에 따라 특성임피던스가 증가하며 I Layer의 폭이 2 μm 일 때 40 GHz에서 특성임피던스를 약 50 Ω 이고 특성임피던스가 25 Ω 임을 알 수 있다. 그림 4는 그림 2의 구조에서 진성영역의 폭을 6 μm 부터 2 μm 까지 감소시켰을 때 마이크로파의 유효굴절률을 보여준다. 진성영역의 폭이 6 μm 광 도파관 해석을 통해 얻어진 광파의 유효굴절률은 3.6 이며, 40 GHz에서 폭이 6 μm 일 때 마이크로파의 유효굴절률은 4.51 이고 폭이 2 μm 일 때의 유효굴절률은 3.62 임을 볼 수 있다. 그리고 폭이 6 μm 일 때의 속도 정합은 89.3 % 이다.

2.2 Optical response

도파관의 진성영역의 흡수계수는 전극을 따라 진행하는 마이크로파에 의해 비선형적인 영향을 받는다. 전송선로를 따라 진행하는 도파관의 입장에서 본 상대적인 전위 $V(w,z)$ 는 다음과 같이 표현된다^[4].

$$V'(\omega_m, z) = V_S \frac{Z_m}{Z_m + Z_S} \frac{1}{1 - \Gamma_S \Gamma_L e^{-2\gamma_m L}} \times \left[\frac{e^{-j\omega_m L} - 1}{u^+ L} + \Gamma_L e^{-2\gamma L} \frac{e^{j\omega_m L} - 1}{u^- L} \right] \quad (3)$$

여기서,

$$u^\pm = \left[\frac{\omega_m}{c_0} (N_{eff} \mp n_o) - j\alpha \right] \quad (4)$$

V_S , Z_S 는 마이크로파 입력전원과 입력전원의 특성 임피던스, Z_m , Γ_S , Γ_L 은 입력임피던스, 입력단의 반사계수와 출력단의 반사계수, c_0 , v , L 은 진공에서 광파의 속도, 마이크로파 전파상수와 소자의 길이, N_{eff} , n_o , α 는 마이크로파 굴절률과 광파의 굴절률, 감쇠상수를 의미한다. 전극의 변조영역의 흡수영역에서 발생하는 흡수계수의 변화는 수식(3)을 이용하여 계산된 상대전압을 도파관의 진성영역에 인가되는 전계로 환산하여 계산하였다. 그림 5는 그림 1의 구조에서 진성영역의 폭을 변화시켰을 때의 마이크로파 특성을 FDTD를 사용하여 계산한 결과를 이용하여 Optical response를 계산한 결과이다. 진성영역의 폭이 좁아지면 진성영역에 걸리는 마이크로파와 광파의 속도정합과 임피던스 정합이 개선되고 또한 마이크로파 손실의 감소로 인해 optical response가 향상되는 것을 확인할 수 있다.

3. 진행파형 전계 흡수 광변조기의 제작

3.1 제작

그림 1의 구조로 성장한 wafer를 사용하여 그림2의 단면을 갖도록 도파로의 폭은 6 μm , N+층이 드러나도록 식각깊이를 2.4 μm 로 습식식각하였다. 도파로의 방향은 역메사 방향 [1 0 0] 으로서 InGaAs층은 $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ 계열로 식각하고, InP층은 $\text{HCl} : \text{H}_3\text{PO}_4$ 로 선택식각 하였다. Polyimide를 도포한 후 curing하여 고형화 한 후, 식각된 부분을 평탄화 하였다. 기생캐패시턴스를 최소화하기 위해 금속패드를 polyimide위에 배치하였고 Ohmic 층은 접촉저항이 비교적 작은 Ti/Pt/Au를 증착하였

다. 도파로의 길이는 700 μm 로 제작하였다. 진행파형 전계 흡수 광변조기는 패드모양을 A, B, C 세가지 형태로 제작하였고, Top-View를 그림 6에 나타내었다.

3.2 마이크로파 특성측정

그림 7과 그림8은 진행파형 전계 흡수 광변조기의 S-parameter 측정치와 측정치를 사용하여 추출된 마이크로파 특성을 이용한 optical response이다. 그림 7에서 S_{11} 과 S_{22} 값이 -4 dB에서 -6 dB정도로 측정되는 것은 제작한 소자의 임피던스가 50 Ω 에 정합 되어있지 않기 때문에 측정장비와 50 Ω 임피던스 부정합 때문에 발생했다. 17 GHz에서 추출된 특성 임피던스는 약 18 Ω 이고, 감쇄상수는 약 800 m^{-1} , 마이크로파 인덱스는 약 2.35 였다. 그림 8.에서 보듯이 소자의 optical response는 약 17GHz 로 예측되었다.

3. 결론

진행파형 전계 흡수 광변조기를 설계 제작하였다. FDTD를 사용하여 소자의 마이크로파 특성을 분석하였으며 분석된 결과를 토대로 제작공정을 고려하여 진성영역의 폭을 6 μm 제작하였다. 제작된 소자의 마이크로파 특성을 Vector Network Analyzer로 S-파라미터를 측정하였고, 측정된 S-파라미터로부터 특성임피던스, 마이크로파 인덱스, 감쇄상수등을 추출하였고, 추출된 마이크로파 특성으로부터 Optical Response를 계산하여 3 dB 대역폭이 약 17 GHz로 예측되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. Z. Zhang, et. al. "25-GHz Polarization Insensitive Electroabsorption Modulators with Traveling-Wave Electrodes.", *IEEE Photon. Technol., Lett.*, vol. 11, no. 2, pp.191-193, 1999.
- [2] T. Ido, et al., *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 2026-2034, 1996.
- [3] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-14, 302-307, 1966.
- [4] M. Koshihara, et. al. "Finite-Element Modeling of Broad-Band Traveling-Wave Optical Modulators", *IEEE Tran. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, . pp 1627-1633, 1999.

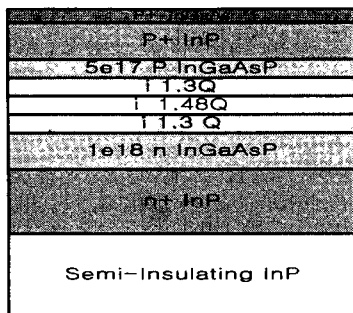


그림 1. 진행파형 전계 흡수 광변조기의 에피 웨이퍼구조

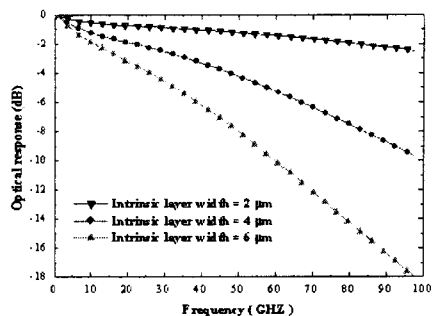


그림 5. 진성영역의 폭을 변화 시켰을 때의 optical response

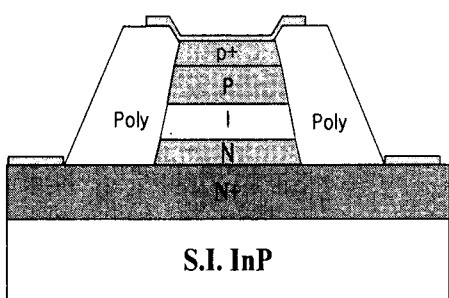


그림 2. 진행파형 전계 흡수 광변조기의 수직 단면

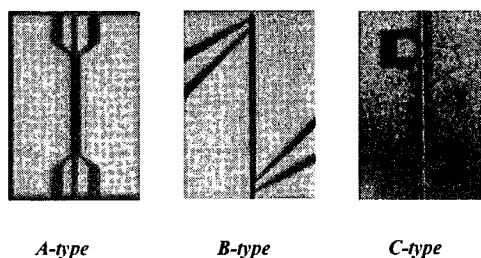


그림 6. 제작된 전계 흡수 광변조기의 Top-view

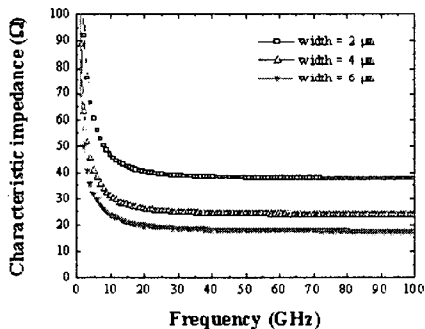


그림 3. 진성영역의 폭을 변화 시켰을 때의 특성임피던스

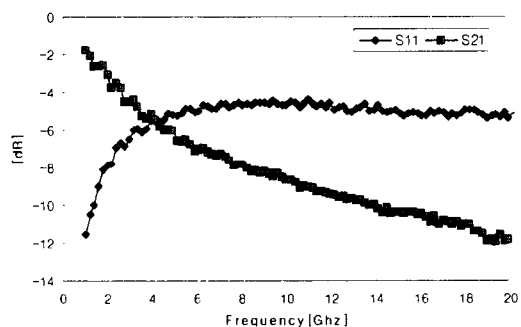


그림 7. 제작된 전계 흡수 광변조기의 S-parameter

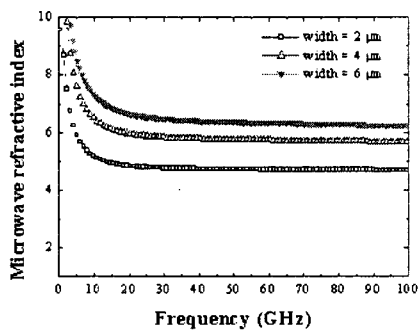


그림 4. 진성영역의 폭을 변화 시켰을 때의 마이크로파 굴절률

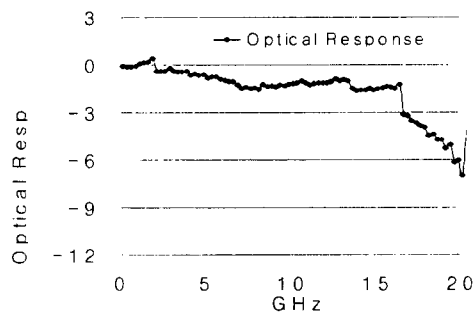


그림 8. 제작된 전계 흡수 광변조기의 optical response