

AP1P3

Mach-Zehnder 형 GaAs 광도파로
변조기의 설계 연구

正會員 李 鍾 振* 正會員 金 炫 培* 正會員 朴 廷 浩* 正會員 朴 鎮 雨*

Study on the Design of Mach-Zehnder Type GaAs
Waveguide Electro-Optic ModulatorJong Jin Lee*, Hyun Bae Kim*, Jung Ho Park*, Jin Woo Park* *Regular Members*

要 約

본 논문에서 GaAs를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 도파로형 광 변조기를 설계 하고, 제작에 필요한 각 변수값을 제시하였다.

변조기의 광도파로는 n-형 GaAs 기판위에 GaAlAs, GaAs 두개의 적층구조로 비대칭형 도파로를 구성 하여 도파층과 기판층의 굴절률차를 크게함으로써 모드의 분산에 의한 전파손실을 감소시킬 수 있도록 하였다. 광파의 변조 기능 해석을 위해 광도파로의 모드이론과 GaAs의 전기광학 효과를 응용하였고, 유효 굴절률법을 이용하여 단일모드 리브(Rib)형 도파로를 설계하였다. 또한 변조기의 여러 설계변수간의 상관관계 및 반도체 공정과정을 고려하여 GaAs 광 도파로 변조기 제작을 위한 제반의 설계변수값을 제시하였다.

ABSTRACT

Mach-Zehnder type GaAs electro-optic waveguide modulator has been designed in this paper. The modulator considered is based on the Mach-Zehnder interferometer configuration, consisting of two Y branch coupling rib type waveguides formed in two epitaxial layers on GaAs substrate.

The mode theory on waveguides and electro-optic effect of GaAs were utilized to determine the design parameters for the modulator proposed. Effective index method was applied to design the single mode asymmetric rib waveguide. The half angle of the Y branch and the physical dimensions of waveguide supporting a single mode were calculated to achieve the optimized operation of the modulator, considering interrelationships between many parameters.

I. 서 론

정보사회로 이진됨에 따라 급증 추세에 있는 대응

*高麗大學校 電子工學科
Dept. of Electronic Eng., Korea University
論文番號 : 92-45(接受1991. 7. 22)

442

량 고속의 데이터 처리요구에 따라 고도화된 광 통신 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 관련된 광소자의 집적화에 따른 저가의 고성능·피신도도의 시스템 실현의 추구는 자연적인 경향이라 할 수 있으며 활발한 집적광학 연구가 진행되고 있다.

광 변조기 전기적 제어신호에 의하여 광파의 정보를 시간적으로 변조시킴으로써 전기신호를 광신호로 변환하는 기능을 갖는다. 광변조 방식에는 레이저 다이오드를 직접 변조하는 방식이 주로 쓰이고 있으나, 그러한 직접변조 방식에는 주파수 chirping [1], modal partition noise 또는 transient multimode excitation [3], RF 흡수손실 [3], 완화진동(relaxation oscillation) [4]등의 레이저 다이오드 자체와 다이오드 패키지(package), 초고주파 회로와 관련된 문제점을 갖는다. 이러한 문제점은 광대역 광통신이나 코히어런트 통신에서 요구되는 변조 성능에 큰 제한이 되고 있으므로, 광원의 후단에서 외부 변기(external modulator)를 사용하고 있다.

외부 변조기로는 집적화된 광 도파로형 변조기가 유리한데 이는 bulk형 변조기에 비하여 넓은 대역폭에서 적은 전력손실, 소형 및 경량화, 특히 집적화된 광원과 광통신에 사용되는 광섬유와 직접 접속시킬 수 있다는 장점이 있다[5].

집적 외부 변조기의 실현 사례는 LiNbO₃, LiTaO₃ 등의 절연 전기광학 결정체를 이용하여 수십 GHz의 대역폭 변조기를 대표로 들 수 있고 일부 실용화 되고 있다[6, 7]. 그러나 광소자의 집적화 목적과 상반되는 문제점, 즉 다른 광소자와의 접속에 따르는 misalignment, 외부의 진동 및 열적 변화에 대한 특성 불안의 제한을 갖고 있다. 그러므로 광원 및 광 검출소자와 함께 집적화를 이룸으로써 고 신뢰도와 다 기능적 집적이 가능하고, 대량생산에 따른 경비 절감의 효과를 얻을 수 있는 화합물 반도체를 이용한 광 변조기 개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 변조기 설계에서 많은 연구의 대상이 되었던 유리나 크리스탈계의 매질을 피하고 비교적 높은 광손실의 재료의 특성에도 불구하고 독특한 전기광학적 장점을 갖고 있는 GaAs/GaAlAs의 화합물 반도체 매질을 이용한 광 도파로 변조기를 설계하고자 하였다.

본 연구의 변조기는 GaAs 기판위에 두 채널 리브(rib)형 도파로의 Mach-Zehnder 간섭계 구조를 갖는다. 두 채널에 통과하는 광파의 위상을 외부 전기장에 의한 GaAs의 전기광학적 효과를 이용하여 변화시킴으로써 변조기 종단에서 광파 간섭에 의한 세기 변조효과를 얻도록 하였다. 이러한 변조기를 구성하기 위하여 2개의 Y자 도파로를 갖게되며 채널의 광파 위상변조는 도파로 위에 형성되는 전극에 의하여

이룬다.

변조기를 설계함에 있어서 비대칭형 단일모드 광도파로를 유호 물질분법을 응용하여 설계하였으며 광도파로의 길이는 GaAs의 전기광학효과의 크기에 의하여, 그리고 변조전극의 형성과 역전압 바이어스의 크기는 쇼트키장벽(Schottky barrier)과 공핍층 깊어등을 고려하여 결정하였다.

II. GaAs 도파로 변조 이론

2.1. 'Y' 자형 광도파로의 변조원리

본 연구에서 대상으로 하는 변조기 구조에서 입력단 그리고 출력단에의 두개의 'Y' 자형 광도파로는 모드의 분리와 결합을 시키는 역할을 한다. 입력측 'Y' 자형 도파로에서의 모드분리 현상은 그림1과 같이 설명할 수 있는, 홀수차 모드 p_{odd} 에 대하여 분리된 각각의 모드는 $p = (p_{\text{odd}}-1)/2$ 가 되고 짝수차 모드 $p_{\text{even}}/2$ 가 됨을 알 수 있다[8].

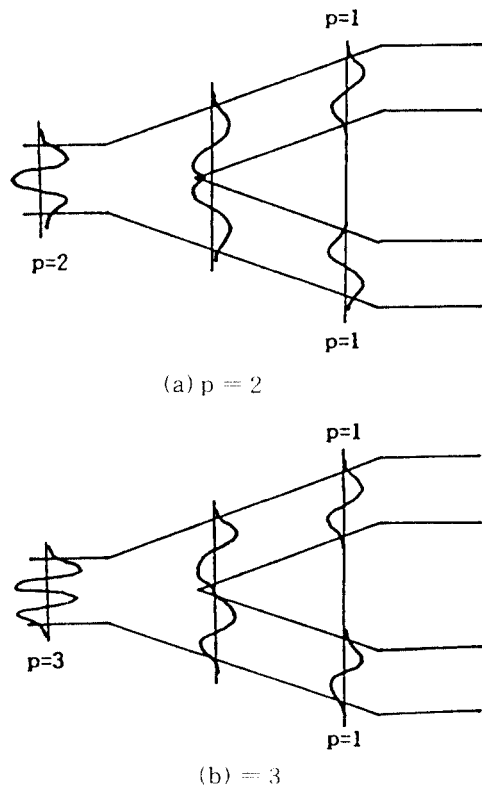
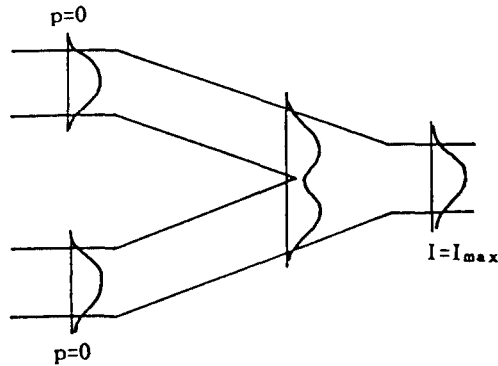


그림 1. 입력 'Y'자형 도파로에서의 모드분리
Fig. 1. Mode separation at input Y branch waveguide

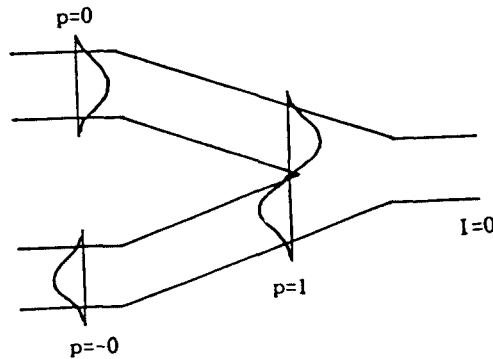
위와 같이 분리된 모드는 각각 두 도파로로 나뉘어 진행하는데 두 도파로 사이의 간격은 모드 결합이 일어나지 않도록 충분히 확보되어야 한다. 이때 전극을 통하여 외부 전기장을 도파로내 광파에 가해주면 전기광학 효과에 의하여 도파로의 굴절률이 변화하고 이에 의해 광파의 위상변화가 발생한다. 광파가 진행하는 평행한 도파로의 길이는 전기광학 효과에 의하여 π 만큼의 위상차를 발생시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

두 도파로를 각각 진행한 광파는 출력 'Y'자형 도파로에서 결합하게 되는데 이는 입력측 도파로에서의 모드분리 현상과 매우 흡사하다.

'Y'자형 광도파로 변조기에서는 단일모드 도파로를 설계하여 최저차 모드만을 이용한다. 그 이유는 그림 2와 같이 설명할 수 있다.



(a) $V = 0$



(b) $V = V_{\pi}$

그림 2. 출력 도파로에서의 광파의 세기
Fig. 2. Optical intensity at output waveguide

그림 2(a)는 외부 전기장이 0인 경우로 도파로내 모드는 그대로 재결합하여 최저차 모드($p=0$)를 형성하고 이때 출력광의 세기는 최대가 된다. 하지만 그림 2의 (b)처럼 아래 도파로에 π 의 위상변화를 발생시키도록 V_{π} 만큼의 전압을 가해주면 결합된 모드는 $p=1$ 인 1차 모드가 되고 이는 단일 모드 도파로내를 진행할 수 없으므로 출력광의 세기는 0이 된다. 그러므로 외부 전기장에 의한 광파의 세기변조를 실현할 수 있다.

2.2 GaAs의 전기광학 효과

광학적 이방성을 보이는 유전체 결정은 외부에서 가해주는 전기장에 의하여 굴절률과 흡수계수등의 변화를 보이는데 결정내를 진행하는 광파는 이러한 변화에 의하여 변조될 수 있고 이를 전기광학 효과라 한다. 전기광학 효과에는 굴절률 변화가 외부 전기장에 선형적으로 비례하는 Pockels 효과와 전기장의 제곱에 비례하는 Kerr 효과가 있다[9].

광파가 결정내를 진행할때 경험하는 굴절률은 타원체(index ellipsoid) 좌표계로 나타낼 수 있고, 외부 전기장을 가해줄 때 다음의 식으로 표현된다[9].

$$(1/n^2)_1 x^2 + (1/n^2)_2 y^2 + (1/n^2)_3 z^2 + 2(1/n^2)_4 yz + 2(1/n^2)_5 xz + 2(1/n^2)_6 xy = 1 \quad (1)$$

여기서 전기장에 의한 굴절률 변화는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta(1/n^2)_i = \sum_{j=1}^3 (r_{ij}E_j)$$

이때 1, 2, 3은 각각 x, y, z방향을 나타내며 4, 5, 6은 임의 방향의 외부 전기장에 의한 굴절률 변화가 나타나는 방향을 가리킨다. r_{ij} 는 전기 광학 상수로서 6×3 행렬이다. GaAs의 경우 외부 전기장을 z방향으로 가해준다고 가정하면 (1) 식은

$$(x^2/n_x^2) + (y^2/n_y^2) + (z^2/n_z^2) + 2r_{41}E_zxy = 1 \quad (2)$$

이 되고, 이때 xy항을 없애주기 위하여 새로운 좌표축 x' , y' , z' 를 설정하면 (2)식은 $(x'^2/n_x'^2) + (y'^2/n_y'^2) + (z'^2/n_z'^2) = 1$ 이 되며 x' , y' 는 x, y를 45° 회전이동 시킨 것이므로,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

가 된다. 그러므로 (2)식은 다음과 같이 된다.

$$(1/n_x^2 - r_{11}E_z) x'^2 + (1/n_y^2 - r_{11}E_z) y'^2 + z'^2/n_z^2 = 1$$

y방향으로 편광된 광파를 입사했을 경우 이 빛이 경험하는 굴절률 변화는 $n_y' = n_y - (n_y^3 r_{11} E_z / 2)$ 에서

$$\Delta n_y' = -n_y^3 r_{11} E_z / 2 \quad (3)$$

가 된다.

2.3. 변조 모의 실험

광 변조 원리에 의한 컴퓨터 모의 실험결과를 그림 3에서 보여 주고 있다. 즉, 입사된 광파를 $E_{in} = 2 E_0 \cos \omega t$ 라 하면 입력 Y 도파로에 의해 분리된 광파는 아래와 같이 된다.

$$E_A = E_0 \cos \omega t$$

$$E_B = E_0 \cos[\omega t + \Delta \Phi(t)]$$

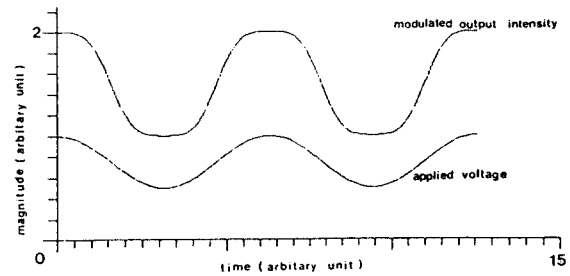
여기서 $\Delta \Phi(t)$ 는 도파로 B에 인가한 외부 전기장에 의한 전기광학 효과로써 유발되는 위상 변화로써, $\Delta \Phi = n_y^3 r_{11} v / \lambda_0$ 이다. 위와 같이 위상 변조된 광파는 출력 Y 도파로에서 결합하게 되고 이때 출력 광파는,

$$E_{out} = E_0 [\cos \omega t + \cos(\omega t + \Delta \Phi)]$$

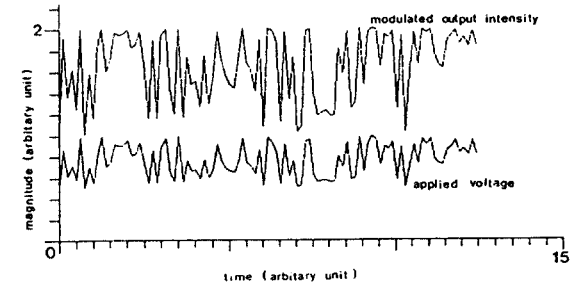
와 같이 된다. 그러므로 변조기 종단에서 출력 광파의 세기는 다음과 같고, 외부 전압 V에 의해 광파의 세기가 변조됨을 알 수 있다.

$$I_{out} = 2 E_0^2 \cos^2 \left[-\frac{\pi n_y^3 r_{11} V}{2 \lambda_0} \right] \quad (4)$$

그림 3의 (a)에서 출력 광파의 세기가 극치(peak) 부분에서 약간의 왜곡이 일어남을 볼 수 있는데 이는 식(4)에서 알 수 있듯이 출력 광파의 세기가 외부 전압 V에 대해 선형적으로 변조되지 않고 cosine의 제곱으로 변조됨에 기인한다.



(a)



(b)

그림 3. Mach-Zehnder 형 변조기의 세기변조 모의 결과
(a) sine 파형에 대한 변조
(b) random 파형에 대한 변조

Fig. 3. Simulation of Mach-Zehnder type modulator
(a) Modulation to the sine wave
(b) Modulation to the random signal

Ⅲ. 광 도파로 변조기의 설계 변수 결정

3.1 평면 광 도파로내의 모드

광 도파로내 모드의 수는 도파로의 두께와 폭, 그리고 기판과 덮개층, 도파로의 굴절률등에 의해 결정된다. 본 연구에서는 유효 굴절률법을 이용한 모드 해석을 하였다.

그림 4와 같은 평면 광 도파로 내에서 광파는 전반사를 일으키며 임의의 각으로 진행하는데 반사각 θ 는 모드에 따라 각각 다른 값을 갖는다. 광파가 A에서 C까지 진행할때 두가지 형태의 위상변화가 일어나는데, 그중 하나는 A에서 C까지 도파하면서 발생하는 위상변화, 즉 $\Delta \phi = |k_g| \cdot L$ 에서 $\phi_{AR} = k_0 n_x d \cos \theta$ 인데 $AC=2 \cdot AB$ 이므로 전체 위상변화는 $2\phi_{AB}$ 가 된다. 또다른 형태의 위상변화는 B와 C에서의 반사에 의한 것으로서 이때의 위상변화는 각각 $2\phi_s$,

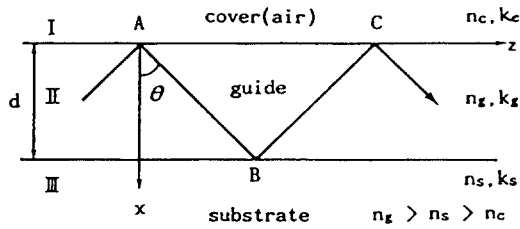


그림 4. 평면 광 도파로내에서의 도파모드
Fig. 4. Guided mode in planar optical waveguide

2ϕ 이다. 이때 ϕ 는 TE 모드에 대해 $\phi_{TE} = \tan^{-1}((n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2)^{1/2} / n_1 \cos \theta)$ 이고 ϕ 에 대해 $n_1 = n_g, n_2 = n_s$ 가 되고 ϕ 에 대해서는 $n_1 = n_g, n_2 = n_c$ 가 된다[10].

광파가 도파로내를 계속 도파할 수 있을 조건은 이와같은 위상변화들의 합이 2π 의 정수배가 되어야 하는데 그렇지 않을 경우 광파는 상호 간섭에 의해 모두 소멸된다[10]. 그러므로

$$2\phi_{AB} - 2\phi_c - 2\phi_s = 2p\pi \quad (p=0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

가 되어야 한다. 다음과 같이 정규화된 변수를 정의하면,

$$v = k_0 d (n_g^2 - n_s^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$b = (N^2 - n_s^2) / (N_g^2 - n_s^2) \quad (7)$$

b : 도파 지수(guide index)

v : 정규화 도파층 두께(normalized film thickness)

N : 유효 굴절률, $N = \beta / k_0$, β 는 진행방향의 전파 상수

(5)식은 다음과 같이 된다.

$$V(1-b)_{1/2} = p\pi + \tan^{-1}(b/(1-b)^{1/2}) + \tan^{-1}((b+n_{TE})/(1-b))^{1/2} \quad (8)$$

여기에서 n_{TE} 는 도파로의 비대칭성(asymmetricity)으로서 $n_{TE} = (n_s^2 - n_c^2) / (n_g^2 - n_c^2)$ 로 나타내어진다.

저차모드 2개에 대한 (8)식의 그래프는 그림 5와 같으며 v를 조절함으로써 도파로내 모드의 수를 조절할 수 있음을 알 수 있다.

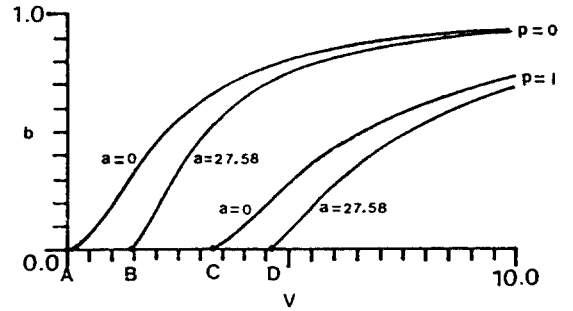


그림 5. 평면 광 도파로에 대한 b-v 곡선
Fig. 5. b-v diagram of planar optical waveguide

3.2. 광 도파로 변조기의 설계

변조기 구성의 광 도파로는 그림 6에서 보이듯이 리브(rib) 도파로 형태를 갖는다. 리브 도파로는 급속 전파에 의한 흡수 손실이 크지만 내장(embedded) 도파로에 비해 제작이 용이하고 낮은 외부 전기장에 의해 높은 광변조의 장점이 있어 선택하게 된다. 리브 도파로는 리브가 형성된 부분과 형성되지 않은 부분의 도파로 두께 차이에 의한 유효 굴절률의 변화로서 2차원적으로 광파를 제한하게 된다.

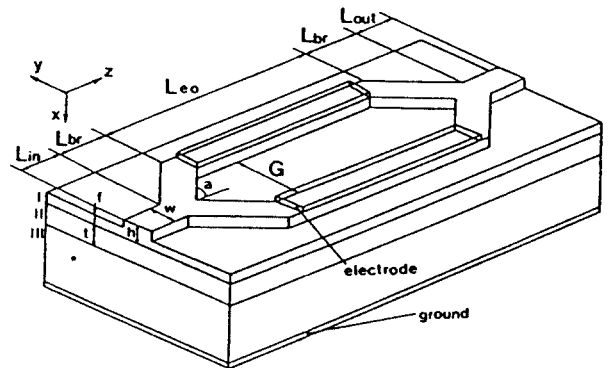


그림 6. 도파로형 광변조기의 구조
Fig. 6. Structure of waveguide electro-optic modulator

그림 6에서 영역 I은 도파로서 $10^{15}/\text{cm}^2$ 정도의 n-형 도핑을 시켜 약 3.405의 굴절률을 갖는다. 영역 II는 A1을 10% 첨가 시키고 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 의 도핑으로서 3.49 정도의 굴절률을 갖는데 A1에 의해 굴절률차를 증가시킴으로써 영역 II내 광파의 분산이 작아짐에 따라 전파 손실(propagation loss)를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 영역 II의 두께는 약 1um 하였다.

본 연구에서의 모든 계산은 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 인 파장의 빛에 대해 행하여졌다.

3.2.1. Y 도파로 분리각

그림 6에서의 'Y' 도파로 분리각 a 는 산란손실과 전체 변조기의 길이에 영향을 미치는 중요한 설계변수이다. a 가 작으면 'Y' 도파로에서의 산란손실은 감소하지만 이 부분의 도파로 길이가 길어짐으로서 해서 전파 손실(propagation loss)의 증가를 가져오고, a 가 클 경우 이와 반대가 된다. 'Y' 도파로와 같이 분리되는 광도파로에서의 산란손실은 Marcuse의 step 근사방법[11]을 바탕으로 Burns와 Milton[12]에 의하여 이론적으로 계산된 바가 있고, 실험적인 값으로는 $a = 0.57^\circ$ 일때 약 1dB의 손실, 1.9° 일때 약 2dB, 그리고 2.3° 일때 손실은 약 2.6dB 정도로 알려져 있다[8].

전파손실은 약 4dB/cm[13]로서 산란손실에 비해 매우 작다. 또한 이러한 전파손실은 GaAs 매질에 기본적으로 내재하는 것이 아니고 변조기 제조시 표면과 경계면에서의 불균일함이나 결정(crystal)의 결함에 의한 것으로서 반도체 기술의 발달과 신중한 제조공정을 통하여 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

그러므로 도파로 분리각 a 는 산란손실을 최소화하는데 중점을 두어 작게 할수록 좋으나 이 또한 공정상의 한계가 있다. 본 연구에서는 위에서 설명한 사항들과 또한 기존의 연구내용에 바탕을 두어 $a=1^\circ$ 로 결정하였다.

3.2.2. 단일모드 도파로의 설계

'Y'자형 광도파로 변조기에서 도파로가 단일모드 이어야 함은 앞에서 설명한 바 있다. 본 연구에서는 단일모드 리브형 광도파로를 설계함에 있어서, 유효 굴절률법에 의하여 그림 5에서의 단일모드 영역내에서 도파로의 폭과 리브의 높이등을 결정하게 된다. 그림 6에서 도파로 부분은 그림 7과 같이 된다. 우선 식(8)를 이용하기 위해 비대칭성(asymmetry)를 계산하면 하면 $n_c=1.0$, $n_s=3.349$, $n_g=3.405d$ 에 대하여 $a_{TE}=(n_s^2-n_c^2)/(n_g^2-n_s^2)=27.58$ 이 된다. 이대 단일모드 영역은 그림 5에서의 B-D 구간인데 이 구간내에서 h 와 f 를 결정해야 한다. $h=1.1\mu\text{m}$, $f=1.03\mu\text{m}$ 에 대하여

$$V_h = (2\pi/\lambda) h (n_g^2 - n_s^2) = 3.236$$

$$V_f = (2\pi/\lambda) f (n_g^2 - n_s^2) = 3.03$$

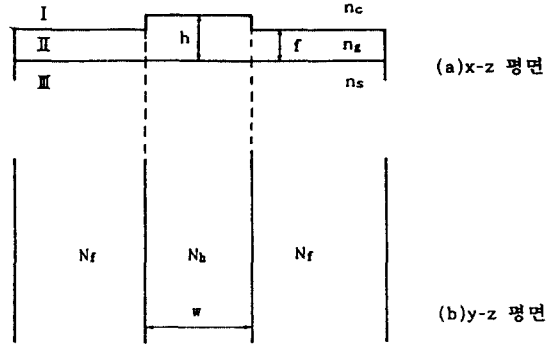


그림 7. 리브형 광도파로의 구조
Fig. 7. Structure of rib waveguide

이 되고 이때의 유효 굴절률은

$$b_h = 0.519 = (N_h^2 - n_s^2) / (n_g^2 - n_s^2)$$

$$b_f = 0.475 = (N_f^2 - n_s^2) / (n_g^2 - n_s^2) \text{에서}$$

$N_h = 3.379$, $N_f = 3.376$ 이 된다. 이때 h 와 f 의 차이는 도파로 폭에 많은 영향을 미치는데 너무 크게할 경우 도파로의 폭이 좁아져서 공정상의 어려움이 따르고, 너무 작게할 경우 전극이 위에 입혀지는 구간에서 비대칭성(asymmetry)가 증가해 $N_h < N_f$ 가 되어 기본 모드 전파가 불가능하게 되기 때문에 신중한 설계가 요구된다.

위와 같은 구조는 그림 7의 (b)와 같이 y-z 평면상에서 대칭 도파로를 형성하는데 이때는 $a_{TE} = 0$ 이므로 단일모드 영역은 그림 5에서 A-C구간이 된다. 그러므로

$$V = (2\pi/\lambda) W (N_b^2 - N_f^2)^{1/2}, 0 \leq V \leq 3.1 \text{에서}$$

단일모드만을 도파하기 위한 도파로의 폭은 $0 \leq V \leq 5.039\mu\text{m}$ 가 된다.

위와 같은 설계과정을 거쳐 결과적으로 도파로는 종방향, 횡방향으로 모두 최저차 모드 ($p=0$)만을 도파하는 단일모드 도파로가 된다.

3.2.3. 도파로 길이의 결정

앞 절에서는 단일모드만을 도파하기 위한 리브도파로의 두께와 폭을 계산하였다. 이제 그림 6의 도파로 구조와 변조전극을 가정할 때 도파로의 각 부분의 길이 및 간격을 결정하여 변조기를 구성하는 도파로의 전체적인 구조를 살펴본다.

그림 6에서 외부 전기장에 의해 전기광학 효과를

반는 평행한 도파로의 길이 \$L_{eo}\$는 인가된 전기장에 의한 위상의 변화가 \$\pi\$만큼 발생할 수 있도록 계산되어야 한다. \$L_{eo}\$만큼의 길이를 진행했을 때 광파의 위상 변화는

$$\Delta\Phi = |\Delta\beta| L_{eo} = \pi \tag{9}$$

인데 이때 \$\Delta\beta\$는

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \Delta n_k \cdot k_0 \\ &= \frac{-n_g^3 r_{11} E}{2} k_0 \\ &= \frac{-n_g^3 r_{11} E}{2} k_0 \quad \text{이므로} \end{aligned}$$

이것을 (9)식에 대입하면,

$$V \cdot L_{eo} = \frac{2h\pi}{n_g^3 r_{11} k_0} \tag{10}$$

와 같이 된다. 식(10)과 같은 \$V \cdot L\$의 값은 원하는 만큼의 변조효과를 얻기 위한 구동전력과 변조기 길이의 곱으로서 변조기의 성능을 가늠하는 중요한 계산값중의 하나이다. 본연구의 경우 이값은

$$\begin{aligned} V \cdot L_{eo} &= 0.0253 \\ h &= 1.1 \text{ } \mu\text{m}, n_g = 3.405, \\ r_{11} &\doteq 1.43 \times 10^{12} \text{ m}^{-1} \text{ v}, \lambda = 1.3 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

정도가 된다. 그러므로 \$L_{eo} \sim 3\text{mm}\$로 하였을 경우 \$\pi\$만큼의 위상 변화를 유발 시키기 위한 변조 전압 \$V_{\pi}\$는 약 \$8.43\text{V}\$가 된다. 하지만 이때 도파로를 진행하는 광파와 인가된 외부 전기장이 얼마나 잘 중첩이 되느냐 하는 것 또한 \$V_{\pi}\$ 값에 영향을 미친다. 이러한 중첩의 정도를 나타내는 변수는 \$\Gamma\$로써 다음과 같이 나타낼 수 있고 [13],

$$\begin{aligned} \Gamma &= \iint E |E'|^2 dA \\ E &: \text{인가 외부 전기} \\ E &: \text{정규화된 광파의 분포} \end{aligned}$$

이는 0과 1사이의 값을 갖는다.

본 연구에서와 같은 반도체 매질의 광 변조기의 경우 외부 전기장은 공핍 영역이 형성된 도파로 부분에

모두 걸리게 되므로 \$\Gamma\$는 1에 가까운 큰 값을 갖을 것으로 예상된다. 실제로 \$V_{\pi}\$값은 \$8.43\text{V}\$보다는 큰 값을 갖을 것이다.

도파로 사이의 간격 \$G\$는 두 도파로간의 모드 결합을 고려하여 결정해 주어야 한다. 즉 간격 \$G\$가 상하 도파로간의 모드 결합을 배제할 수 있도록 충분히 확보되지 않을 경우 도파로간 광파의 상호 에너지 교환으로 인해 출력 광파의 세기는 예측하지 못한 결과를 갖을 가능성이 있다. 그러므로 \$G\$는 두 도파로 사이에 모드결합이 일어나지 않도록 충분히 확보되어야 하는데, 이는 식 (11)과 같은 결합상수의 계산을 통해 얻어진다[14].

$$\kappa = \frac{2r^2 q e q^4}{\beta w (q^2 + 1)^2} \tag{11}$$

\$q\$: 두 도파로 사이 매질에서의 홀광 계수

\$r\$: 도파로내에서의 \$y\$방향 전파 상수

관점한 두 도파로간의 모드 결합 이론은 Yariv [15] 에 의해 정리 되었는데 두 도파로 사이의 광 에너지는 다음 (12)식과 같이 서로 교환된다.

$$\begin{aligned} p_0(z) &= \cos^2(\kappa z) \exp(-\alpha z) \\ p_1(z) &= \sin^2(\kappa z) \exp(-\alpha z) \end{aligned} \tag{13}$$

이때 에너지가 서로 100% 교환되는 주기는,

$$\kappa z = m\pi/2 \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

가 된다. 그러므로 \$\kappa\$를 50으로 할때 100% 에너지 전달을 위한 길이 \$z\$는 \$z = 31.4\text{mm}\$가 되는데 이 정도의 값이면 본 연구에서의 \$L_{eo}(3\text{mm})\$ 구간에서의 모드결합은 무시할 수 있을 것이다. 그러므로 식(11)에서 \$\kappa < 50\$이 되도록 \$G\$를 계산해 주어야 한다. 이때 다음과 같은 변수값들의 계산으로 부터 \$G > 14.3\mu\text{m}\$가 된다. 본 연구에서는 \$G = 15\mu\text{m}\$로 결정하였다.

$$\begin{aligned} \beta &= k_0 N_h = 1.63 \times 10^7 \\ W &= 4 \text{ } \mu\text{m} \\ r &= (n_g^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2} = 2.03 \times 10^6 \\ q &= (\beta^2 - n_i^2 k_0^2)^{1/2} = 6.88 \times 10^5 \end{aligned}$$

'Y'자 도파로의 길이 \$L_{br}\$은 \$a = 1^\circ\$, \$G = 15\mu\text{m}\$로 부터

$$\tan 1^\circ = G / (2L_{br}), L_{br} = 0.43\text{mm}$$

가 된다.

출력 도파로의 길이 L_{out} 은 1차 모드 이상의 모드들을 차단시켜서 출력광의 세기가 0이 될 수 있도록 충분히 확보되어야 하는데, 이때 도파로의 길이를 충분히 길게 해주면 큰 흡광비(extinction ratio)를 얻을 수 있어서 좋지만 상대적으로 전파 손실의 증가를 가져온다. 본 연구에서는 L_{in} 과 L_{out} 을 모두 1mm로 결정하였다. 결과적으로 전체 변조기의 길이는

$$L_{tot} = 2L_{in} + 2L_{br} + L_{eo} = 5.86\text{ mm}$$

가 된다.

3.2.4. 변조 전극

GaAs와 같은 반도체 매질을 이용한 광 변조기에서의 변조 전극은 일반적으로 그림8와 같이 도파로 위에 증착시킨다.

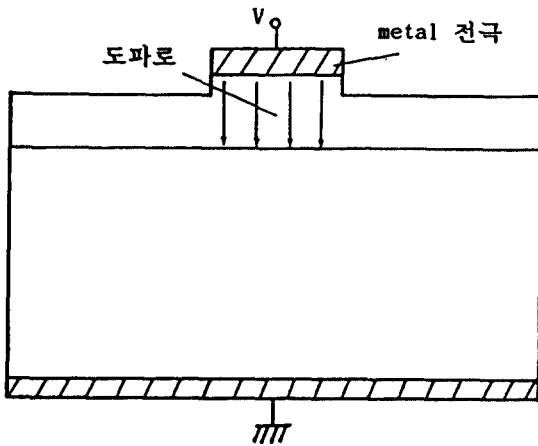


그림 8. 변조 전극의 구조
Fig. 8. Structure of the modulation electrode

이와 같은 구조는 금속과 반도체간에 쇼트키 장벽(Schottky barrier)를 형성하게 되고 이로 인하여 도파로 부분에는 공핍 영역이 생성된다. 이때 공핍 영역의 두께는 도파로내 불순물 첨가 농도와 쇼트키결합(Schottky contact)에 의한 built-in potential, 그리고 인가된 외부 전기장의 크기에 의해 결정된다 [16].

본 연구에서의 $N_d = 1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 에 대해 발생하는 built-in potential은 아래 (13)식으로 부터 약 0.15V [17]가 되고 이로 인해 생성되는 공핍 영역의 두께는 약 $0.45\mu\text{m}$ 정도가 된다.

$$V_{b,i} = \frac{qK \epsilon_0 N_d A^2}{2 C^2} - V_R \quad (13)$$

$K = 13.2$ (GaAs)

$A = 1$: 단위 면적

$C =$ 접합 정전용량(junction capacitance)

$V_R = 0$: 역전압

도파로의 두께는 $1.1\mu\text{m}$ 이고 이 영역 전체에 공핍 영역을 생성시키기 위한 역전압은 약 0.7V 정도로 계산되었다.

이때 $N_d = 2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 인 기관층의 전자에 대한 저항도는 약 $0.002(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ 이고 도파층의 경우 $1.6(\Omega \cdot \text{cm})$ 정도가 되는데 [16], 이는 가해진 전압을 거의 모두 도파층에만 인가할 수 있음을 의미한다. 그러므로 본 연구에서와 같은 쇼트키-리브(Schottky-Rib) 형태의 변조기에서는 작은 전압으로 효율적인 광변조를 실현할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 두개의 Y자형 광 도파로를 갖는 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광 변조기를 설계 하였다. 설계된 변조기는 n형 GaAs 기관 위에 도파층과 보조층의 이중구조로 리브형 도파로를 형성하며, 단일모드 도파로를 만들기 위하여 유효 굴절률법을 이용하여 필요한 설계변수 값을 결정하였다.

도파로 분리각은 모드의 분리 및 결합, 산란 손실 등 전체 변조기 특성에 중요한 영향을 미치는 부분으로서, 도파로 사이의 간격은 15mm로 하여 두도파로 사이의 모드결합을 배제하도록 하였다. 광파가 변조되는 평행한 도파로의 길이는 전기광학 효과의 계산으로부터 π 만큼의 위상차를 발생시킬 수 있도록 설계되었는데 3mm로 결정하였다.

본 연구에서 계산된 설계치를 정리하면 $1.3\mu\text{m}$ 파장의 광원을 가정할 때 총 길이가 약 5.86mm, 주변 보조 영역을 포함하여 폭이 약 $40\mu\text{m}$ 정도의 변조영역을 갖게되며, 입력단 및 출력단의 광손실을 제외하고 산란 손실과 전파손실만을 고려할 경우 약 3dB 이하의 손

실이 예상된다. 본 연구의 결과는 한정된 주요사항만을 고려하여 설계되었으므로 변조기의 정확한 동작 예측에는 그 밖의 광학적, 그리고 재료적인 추가적 사항이 고려되어야 할 것이다. 본 연구의 변조기는 현재 본 연구자들에 의하여 실제 제작중에 있으며 실험적 검증과 동작평가는 차후의 연구에서 이루어질 것이다.

참 고 문 헌

1. A.B.Glenn and G.E.Keiser, "A Perspective of Lightwave Technology," IEEE Communications, pp.8-9, 1985
2. J.Buus, "Dynamic Line Broadening of Semiconductor Lasers Modulated at High Frequencies," Electron. Lett., vol.21, pp. 129-131, 1985
3. C.H.Henry, P.S.Henry, and M.Lax, "Partition Fluctuations in nearly Single Longitudinal Mode Lasers," J.Lightwave Technology, vol. LT-2, pp.209-216, 1984
4. T.Ikegami and Y.Suematsu, Proc. IEEE 55, pp.122, 1967
5. P.K.Tien, "Integrated Optics and New Wave Phenomenon in Optical Waveguide," Rev. Mod.Phys., vol.49, pp. 361-381, 1977
6. D.E.McCumber, "Intensity Fluctuations in the Output of CW Laser Oscillators," Phys.Rev., vol.141, pp.306-322, 1966
7. K.Kubota, J.Nova, and O.Mikami, "Traveling-Wave Optical Modulator using Directional Coupler LiNbO₃Waveguide," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-16, pp.754-760, 1981
8. T.R.Ranganath, "Ti diffused NiNbO₃ Branched Waveguide Modulators: Performance and Design," IEEE J.of Quantum Electronics, vol. QE-13, No.4, pp.290-295, Apr., 1977
9. A.Yariv and P.Yeh, Optical Waves in Crystal, John Wiley & Sons, 1984
10. T.Tamir, Integrated Optics, NewYork: Springer-Verlag, 1975
11. D.Marcuse, "Radiation Losses of Tapered Dielectric Slab Waveguides," Bell System Technical J., vol.49, pp.273-290, 1970
12. W.K.Burns and A.F.Milton, "Mode Conversion in Planar Dielectric Separating Waveguides," IEEE J.of Quantum Electronics, vol. QE-11 No.1, Jan., 1975
13. R.C.Alferness, "Waveguide Electro-optic Modulators," IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology, vol. MTT 30, No.8, pp.1121-1137, Aug., 1982
14. R.C.Hunsperger, Integrated Optics: Theory and Technology, Springer-Verlag, 1984
15. A.Yariv, IEEE J. of Quantum Electronics, vol. QE 9, pp.919, 1975
16. E.H.Rhoderick and R.H.Williams, Metal Semiconductor Contacts, 2nd Edition, Oxford Science Publications, 1987
17. F.S.Yang, Fundamentals of Semiconductor Devices, McGraw Hill Book Company, 1978



李 鍾 振(Jong Jin Lee) 正會員
 1967年 8月 17日生
 1990년 2월 : 고려대학교 전자전산
 공학과 졸업(공학사)
 1992년 2월 : 고려대학교 전자공학
 과(공학석사)
 1992년 3월~현재 : 삼성반도체 연
 구원

金 炫 培(Hyun Bae Kim) 正會員
 1968년 9월 7일생
 1991년 2월 : 고려대학교 전자전산공학과 졸업
 1991년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 석사과정중
 ※주관심분야 : 광 집적회로, 마이크로파 공학



朴 廷 浩(Jeong Ho Park) 正會員
 1955년 12월 26일생
 1981년 2월 : 고려대 전자공학과 졸
 업
 1987년 12월 : 미국 Univ of Dela-
 ware 공학박사 학위
 취득
 1987년~1990년 : 규성사 중앙연구
 소 연구원

朴 鎭 雨(Jin Woo Park) 正會員
 1955년 7월 5日生
 1979년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업
 1980년 : 한국통신기술연구소 연구원
 1983년 8월 : 미국 클렘슨 대학교(공학석사)
 1987년 11월 : 미국 버지니아 주립대학교(공학박사)
 1988년 : 명지대학교 전자공학과 전임강사
 1989년~현재 : 고려대학교 전자공학과 조교수

1990년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 조교수
 ※주관심분야 : III-V 화합물 반도체 소자, 광 집적회로