

완전 스위칭이 가능한 Ti:LiNbO₃ 진행파 광변조기

곽재곤[†] · 김경암 · 김영문 · 정은주 · 피중호 · 박권동 · 김창민

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

Ⓣ 130-743 서울시 동대문구 전농동 90번지

(2003년 6월 5일 받음, 2003년 8월 19일 수정본 받음)

Ti:LiNbO₃ 세 도파로 방향성 결합기와 CPW 진행파 전극으로 구성된 완전 스위칭이 가능한 외부 광변조기를 설계, 제작하였다. 결합 모드 이론을 이용하여 세 도파로 광결합기의 스위칭 현상을 해석하였으며, 유한차분법을 이용하여 단일 모드를 갖는 광도파로의 설계 및 공정 파라미터를 도출하였으며, 이를 이용하여 광 결합길이를 계산하였다. 등각사상법과 반복이완법을 이용하여, CPW 구조 진행파 전극의 특성임피던스와 M/W(Micro wave) 유효굴절률 정합조건을 동시에 만족하는 설계 파라미터를 도출하였다. 제작된 세 도파로 광변조기의 삽입손실과 스위칭 전압은 약 4dB와 19V였으며, S 파라미터를 측정하여 특성임피던스 $Z_c = 45 \Omega$, M/W 유효굴절률 $N_{eff} = 2.20$, 그리고 감쇠상수 $\alpha_c = 0.055/cm \cdot \sqrt{GHz}$ 등의 진행파 전극 파라미터를 추출하였다. 추출된 진행파 전극 파라미터를 이용하여 이론적인 주파수 응답 $R(\omega)$ 을 계산하였으며, Photo Detector로 측정된 주파수 응답과 비교하였다. 주파수 응답 측정 결과, 3dB 변조대역폭은 13 GHz로 측정되었다.

주제어 : optical modulator, directional coupler.

I. 서 론

이 분야의 광소자들은 LiNbO₃, GaAs 등으로 제작되어지며, 특히 LiNbO₃는 높은 전기광학효과로 인해 이를 이용한 고속 광변조기의 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 고속 광변조기는 일반적으로 방향성 결합기와 고속 변조를 위한 CPW 구조 진행파 전극으로 구성되며, 광변조기에 이용되는 방향성 결합기의 구조로는 두 도파로 방향성 결합기(Directional Coupler), Branch등이 있다. 이들 방향성 결합기는 집적광학의 초기 단계에서부터 많은 관심을 가져온 소자로서, 광 결합이 일어날 수 있을 만큼 충분히 가까이 위치하는 두 개의 도파로로 구성되어 있다. 최근에는 두 도파로 방향성 결합기 외에도 세 도파로 방향성 결합기의 연구도 진행되고 있으며, 세 도파로 방향성 결합기에 진행파 전극을 장착하여 광변조기 등과 같은 능동소자로서의 활용도 제안되었다.^[1-4] 그러나 세 도파로 방향성 결합기보다 두 도파로 방향성 결합기에 비해 광 결합길이가 $1/\sqrt{2}$ 만큼 짧아 더 넓은 광변조 대역폭을 얻을 수 있는 장점에도 불구하고 아직까지 연구 결과는 거의 보고된 바가 없는 상황이다.

본 논문에서는 이와 같이 두 도파로 방향성 결합기에 비해 광 결합기가 짧은 세도파로 방향성 결합기의 장점을 이용하여 동일한 구조와 등 간격을 갖는 세도파로 방향성 결합기와 CPW 구조 진행파 전극으로 구성된 세 도파로 광변조기를 설계, 제작하였다.

세 도파로 방향성결합기의 스위칭 현상을 해석하는 방법으로는 정상 모드 이론(Normal Mode Theory)^[5,6]과 결합 모드 이론^[7]이 있으며, 본 논문에서는 결합 모드 이론을 이용하여 스위칭 현상을 해석하였다. 스위칭 해석은 크게 광이 어떤 도파로로 일사하느냐에 따라 i) 바깥도파로 입사(W/G1, 또는 W/

G3)와 ii) 가운데 도파로 입사 (W/G2) 로 나누어지고 다시 각각의 경우에 대하여 세 도파로의 굴절률이 인가 전압에 의해 i) 대칭(Symmetric)과 ii) 반대칭(Anti-Symmetric)으로 조정(Detuning)되는 경우로 나누어진다.

본 논문에서는 같은 크기와 등 간격으로 나란하게 위치한 세 도파로 중 가운데 도파로에 광을 입사시키고, 양쪽 옆의 도파로에 전압을 인가하여 굴절률을 반대칭 시킨 구조의 광결합 현상을 해석하였다. 이 경우 세 도파로 방향성결합기의 스위칭 동작을 만족하는 전압이 연속적으로 존재하게 되며, 완전스위칭이 가능하게 된다. 따라서 소자 제작 시 결합길이의 오차가 생기더라도 인가 전압의 변화만으로도 완전스위칭이 가능하므로, 공정 오차에 대해 유연하게 대처 할수 있는 장점을 가지고 있다.

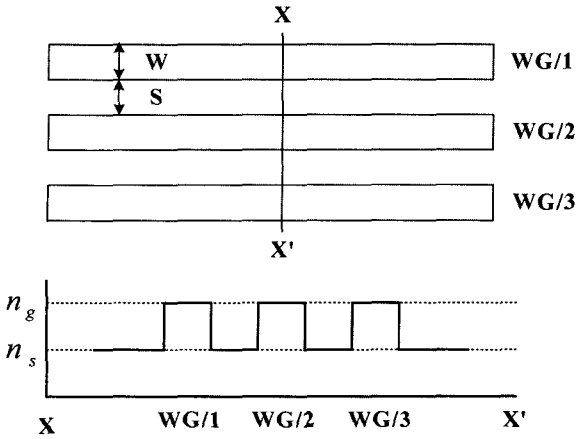
한편, 광도파로를 따라 진행하는 광을 제어하는 역할을 하는 CPW 구조 전극의 설계는 등각사상법^[9,10]과 반복이완법^[11]을 이용하였고, 이를 통해 진행파 전극의 특성임피던스 $Z_c = 50\Omega$ 와 M/W 유효굴절률과 $N_{eff} = 2.15$ 를 동시에 만족하는 설계 Parameter를 구하였다. 각각의 설계 파라미터를 바탕으로 진공열증착, 표준 사진식각법, 건식식각, 내부확산, 전기분해등의 반도체 공정을 통해 소자를 제작하였고, Network Analyzer와 광검파기 등을 이용하여 제작된 광변조기의 전극 파라미터 추출과 주파수 응답 $R(\omega)$ 를 측정하였다.

II. 세 도파로 방향성 결합기 해석

2.1. 세 도파로 결합모드 방정식(Three-waveguide Coupled mode Theory)^[7,8]

본 논문에서는 세도파로 방향성 결합기의 광 스위칭 현상을 해석하기 위해 결합모드 이론을 이용하였으며, 그림 1과 같이 동일한 구조와 등 간격을 갖고 단일 모드만 허용하는 광 도파

E-mail: 76pluto@hanmail.net



W : 도파로 폭 S : 도파로 사이 간격

그림 1. 동일한 구조와 등 간격을 갖는 세도파로 방향성 결합기의 굴절률 분포.

로에 대해서 광스위칭 현상을 해석하였다. 그림 1은 동일한 구조와 등 간격을 가지는 세 도파로 광 결합기의 굴절률 분포를 나타낸 것이다.

그림 1에서 n_g , n_s 는 각각 광도파로의 굴절률과 기판의 굴절률을 나타낸다.

먼저 세 도파로 광 결합기의 광 결합 현상을 해석하기 위한 결합 모드 방정식은 다음과 같이 기술되어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz}A_1(z) &= -j\kappa_1 A_2(z)e^{j\Delta\beta_1 z} \\ \frac{d}{dz}A_2(z) &= -j\kappa_1 A_1(z)e^{j\Delta\beta_1 z} - j\kappa_3 A_3(z)e^{j\Delta\beta_3 z} \\ \frac{d}{dz}A_3(z) &= -j\kappa_3 A_2(z)e^{j\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 $A_i(i=1, 2, 3)$ 는 각 도파로를 따라 진행되는 전계의 크기를 나타내며, $\kappa_i(i=1, 2, 3)$ 는 결합계수를 나타낸다. 또한

$$\begin{aligned} \Delta\beta_1 &= \beta_1 - \beta_2 \\ \Delta\beta_3 &= \beta_3 - \beta_2 \end{aligned} \quad (2)$$

이며, $\beta_i(i=1, 2, 3)$ 는 각 도파로의 전파상수이다.

그림 1과 같이 세 도파로가 동일한 구조와 등 간격으로 놓여 있으므로 결합계수 κ 는 $\kappa_1 = \kappa_3 = \kappa$ 로 놓을 수 있다.

식 (1)의 세 도파로 결합모드 방정식을 풀기 쉬운 형태로 만들기 위해 식 (3)과 같이 치환한다.

$$\begin{aligned} A_1(z) &= a_1(z)e^{j\Delta\beta_1 z} \\ A_2(z) &= a_2(z) \\ A_3(z) &= a_3(z)e^{j\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식 (1)은 식 (4)와 같이 기술되어진다.

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \Delta\beta_1 & \kappa & 0 \\ \kappa & 0 & \kappa \\ 0 & \kappa & \Delta\beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

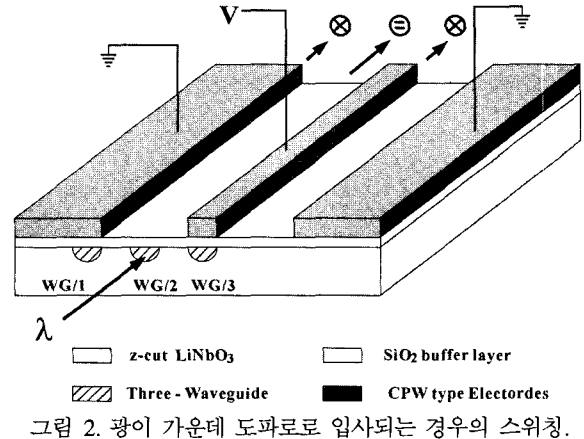


그림 2. 광이 가운데 도파로로 입사되는 경우의 스위칭.

2.2. 세도파로 방향성결합기의 스위칭 현상 해석^[14,15]

본 논문에서는 세 도파로 방향성결합기의 스위칭 현상 해석 중 광이 가운데 도파로로 입사할 때 굴절률을 반대칭(Anti-Symmetric)으로 변화(Detuning)시킨 경우의 스위칭 해석을 하였다.

그림 2는 이와 같은 구조를 설명하기 위한 그림이며, 또한 최종적으로 제작하려는 세도파로 광변조기의 변조영역(Active region)에 해당하는 그림이다.

세 도파로 방향성 결합기의 광 스위칭 현상을 해석하는데 있어 그림 2와 같이 처음 광이 입사된 도파로에서 다른 도파로로 광이 완전히 전달되는 경우를 ⊗ 상태로, 광이 입사된 도파로로 다시 출력되는 경우를 ⊙ 상태로 나타내기로 하겠다.

A. 굴절률의 변화가 없는 경우

그림 2의 도파로 위에 위치하고 있는 전극에 전압을 인가하지 않을 경우 도파로의 굴절률 변화는 없으며, 각 도파로의 굴절률 분포는 그림 3과 같다.

그림 3에서와 같이 $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_2 = \Delta\beta_3$ 이므로 식(4)에서는 $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = 0$ 으로 놓는다.

입사된 광이 다른 도파로로 완전히 이행(⊗ 상태) 되기 위한 광결합길이 L은 다음과 같다.

$$L = (2m - 1) \frac{\pi}{2\sqrt{2}\kappa} = \frac{1}{\sqrt{2}} l_c \quad (5)$$

식 (5)에서 일 때, 처음으로 ⊗ 상태가 되며, 따라서 결합길이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_{c2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} l_c \quad (6)$$

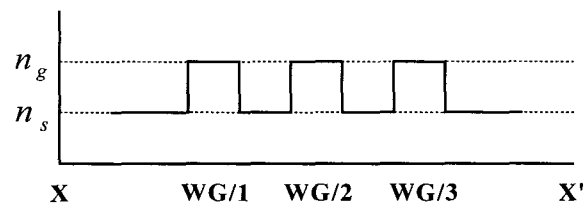


그림 3. 전압이 인가되지 않았을 때의 각 도파로의 굴절률 분포.

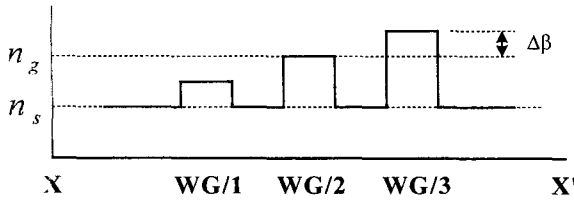


그림 4. 전압을 인가 했을때 각 도파로의 굴절률 분포 : $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$

(6)에서 l_c 는 대칭적인 두 도파로 방향성 결합기의 결합길이를 나타내며, 세 도파로 결합길이에서 l_{c2} 의 아래 첨자 2는 양 끝 입사된 도파로가 가운데 도파로로 임을 나타낸다. 양 끝 입사된 광이 다시 가운데 도파로로 나오기 위한 결합길이의 조건(\ominus 상태)은 식 (7)과 같이 계산된다.

$$L = (2m) \frac{\pi}{2\sqrt{2}\kappa} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

이 때 굴절률을 반대칭(Anti-Symmetric)적으로 변화시킨 경우 그림 2와 같이 도파로 위에 위치하고 있는 전극에 전압을 인가해 주면 그림 1의 각 도파로의 굴절률은 그림 4와 같이 대칭적으로 변화된다. 이때 각 도파로의 전파상수의 변화는 $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 로 표현할 수 있다. 그림 4와 같이 굴절률이 반대칭적으로 변화하는 경우의 식 (7)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + \frac{\kappa^2}{\kappa'^2} & c_2 & c_3 - \frac{\kappa^2}{\kappa'^2} \\ c_2 & 2c_3 + \frac{\Delta\beta^2}{\kappa'^2} & -c_2^* \\ c_3 - \frac{\kappa^2}{\kappa'^2} & -c_2^* & c_1^* + \frac{\kappa^2}{\kappa'^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \\ a_3(0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 때 (8)에서 c_1, c_2, c_3, κ^2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c_1 &= \left(1 - \frac{\kappa^2}{\kappa'^2}\right) \cos \kappa' z - j \frac{\Delta\beta}{\kappa'} \sin \kappa' z \\ c_2 &= -j \frac{\kappa}{\kappa'} \sin \kappa' z + \frac{\kappa \Delta\beta}{\kappa'^2} (\cos \kappa' z - 1) \\ c_3 &= \frac{\kappa^2}{\kappa'^2} \cos \kappa' z \\ \kappa'^2 &= \Delta\beta^2 + 2\kappa^2 \end{aligned} \quad (9)$$

가운데 도파로로 입사된 광이 다른 도파로로 완전히 이행되기 위한 조건 (\otimes 상태)은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\left(\frac{2\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 \left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2 = \cos^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{2\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2} \quad (10)$$

가운데 입사된 광이 다시 가운데 도파로로 나오기 위한 조건(\ominus 상태)은 식 (11)과 같다.

$$\left(\frac{2\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2 = (4m)^2 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

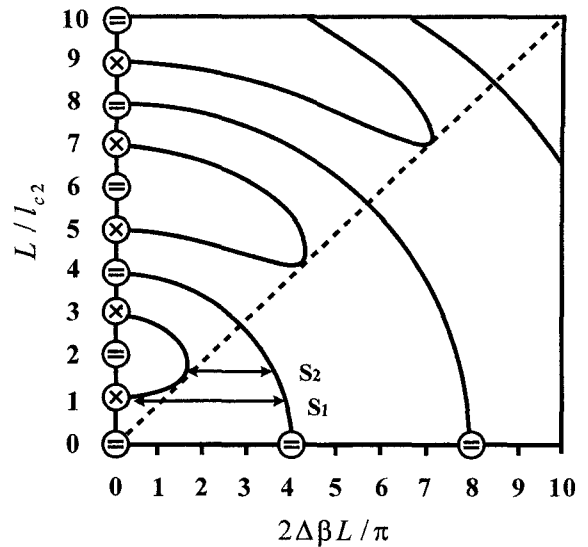


그림 5. 가운데 도파로로 광을 입사시켰을 때, $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우 스위칭 다이어그램.

이상으로 세 도파로 방향성 결합기의 스위칭 해석을 보였으며, 식 (5), (7), (10), (11)등을 이용하여 스위칭 다이어그램을 구할 수 있었다.

그림 5에는 가운데 도파로에 광을 입사시켰을 때, $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭 다이어그램을 나타내었다.

그림 5에서 스위칭 S_1 은 $L=l_{c2}$ 의 경우에 해당하며, S_2 은 임의의 L 에 대하여 스위칭이 가능한 상태를 보여주고 있으며, 그 예로 $L=\sqrt{2}l_{c2}$ 에 대하여 나타내고 있다. 이와 같이 \otimes 상태가 되도록 하는 전압과 \ominus 상태가 되도록 하는 전압이 항상 존재하므로 정확한 결합길이가 요구되지 않으며, 단지 공급되는 전압의 변화만으로도 완전한 스위칭 동작이 가능하게 된다.

그림 6은 $L=l_{c2}$ 와 $L=\sqrt{2}l_{c2}$ 에 대한 가운데 도파로의 출력 파워 변화의 변화를 보여주고 있다.

그림 7은 $L=l_{c2}$ 와 $L=\sqrt{2}l_{c2}$ 일때 세도파로 광결합기의 스위칭 동작을 보여주고 있다.

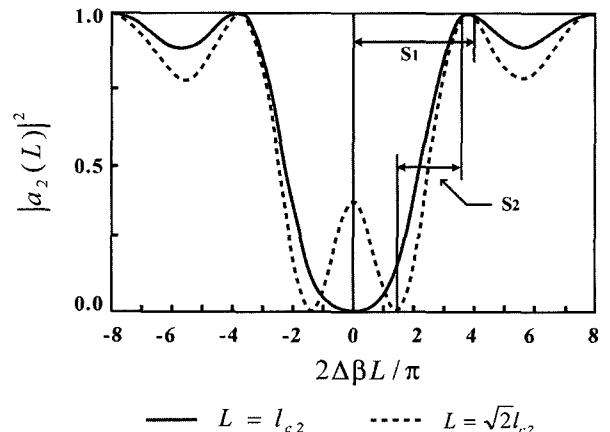


그림 6. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 의 경우에 가운데 도파로의 출력파워 변화

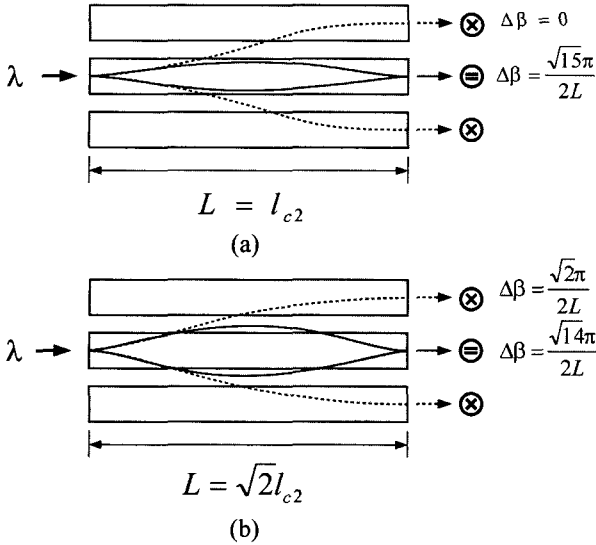


그림 7. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 일 때 세도파로 방향성 결합기의 스위칭 동작 (a) $L = l_{c2}$ 일 때, (b) $L = \sqrt{2} l_{c2}$.

III. 세 도파로 방향성 결합기 및 진행파 전극 설계

3.1. 광도파로 및 결합기 설계 파라미터

유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하여 Ti:LiNbO₃ 단일 모드 광도파로의 설계 및 공정 조건을 도출하였다. 또한 유한차분법으로 계산된 각 도파로의 전파 상수 β 와 정상 모드 이론을 이용하여 세 도파로 광결합기의 결합길이를 계산하였다.

먼저, 단일 모드 광도파로 설계 시 적용 할 수 있는 파라미터로는 Ti strip의 폭과 두께, 그리고 확산 시간과 온도 등이 있다.

표 1은 FDM에 의해 설계된 단일 모드 광도파로의 설계 파라미터이다.

세 도파로 방향성 결합기 설계 시 일반적인 두 도파로 방향성 결합기의 결합길이를 구하는 정상모드 이론을 이용하였다.

동일한 구조와 등 간격으로 놓여 있는 두 도파로 방향성 결합기의 광결합길이 l_c 는 even 모드와 odd 모드간의 맥동 주기의 반으로 나타낸다.

$$l_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} = \frac{\lambda}{2(N_e - N_o)} \quad (12)$$

식 (12)에서 β_e, β_o 는 각각 even 모드와 odd 모드의 전파상수를 나타내며, N_e, N_o 는 even 모드와 odd 모드에서의 모드 굴절률을 나타낸다.

표 1. z-cut Ti:LiNbO₃ 단일 모드 광도파로 설계 파라미터

파장(λ)	LiNbO ₃ 기판	Ti strip 폭	Ti 두께	확산 온도	확산시간
1.3 μm	z-cut	5 μm	900 Å	1025°C	8 hour

표 2. 두 도파로 방향성 결합기의 결합길이

W_1	S	W_2	even 모드 굴절률		odd 모드 굴절률		결합길이	
			N_e	N_o	l_c	l_{c2}		
5 μm	7 μm	5 μm	2.15301	2.15290	10327 μm	7302 μm		

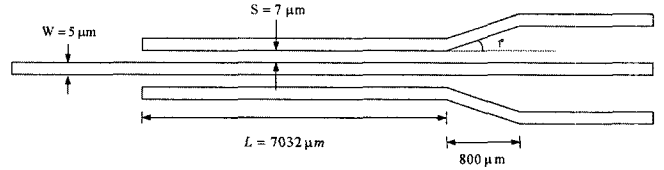


그림 8. 세 도파로 방향성 결합기의 설계 치수.

광이 가운데 도파로로 입사될 경우 세 도파로 방향성 결합기의 결합길이는 식 (13)과 같다.

$$l_{c2} = \frac{1}{\sqrt{2}} l_c \quad (13)$$

표 2에는 유한차분법에 의해 설계된 단일 모드 광도파로의 전파상수 β_e, β_o 를 이용하여 두 도파로 방향성 결합기의 광 결합길이를 계산한 것이다.

표 2에서 W_1 과 W_2 는 두 도파로 방향성 결합기의 각각의 도파로 폭을 나타내며, S 는 두 도파로 사이의 간격을 나타낸다.

이와 같은 설계 파라미터를 바탕으로 설계된 세 도파로 방향성 결합기의 설계 치수를 그림 8에 보였으며, 이는 광도파로 제작시의 Ti Strip의 치수와 같다.

3.2. CPW 구조 진행파 전극 설계

방향성 결합기등의 수동 소자에 진행파 전극을 탑재함으로써 광변조기 등의 능동소자의 기능이 가능하게 된다.

CPW 구조 진행파 전극 중 전극의 M/W 입/출력 영역(M/W feeding region)의 특성임피던스 설계는 등각사상법(Conformal Mapping Method)을 사용하였으며, 광파와 M/W가 상호 작용하여 실제 변조가 일어나는 변조영역(Active region)에서의 특성임피던스 정합과 M/W 유효굴절률 N_{eff} 정합 설계는 반복이완법(Successive Over Relaxation)을 이용하였다.

그림 9는 CPW 구조 진행파 전극의 변조영역과 M/W 입/출력영역을 설명하기 위한 그림이다.

A. 등각사상법에 의한 M/W 입/출력 영역 전극설계^[9,10]

M/W 입/출력 영역은 M/W port와 직접 연결되는 곳으로 Packaging 시의 작업 조건을 고려하면 중앙전극 폭(W)은 대체로 약 300 μm 이상이 되어야 한다. 입/출력 영역에서 중앙전극 폭(W) 및 전극사이의 간격(S)은 전극두께(약 10 μm) 및 SiO₂ 박막의 두께(약 1 μm)에 비해 상당히 크므로 변조영역 설계에 사용될 반복이완법 적용시 방대한 양의 메모리와 계산 시간이 소요되는 등 많은 무리가 따른다. 이러한 이유로 M/W

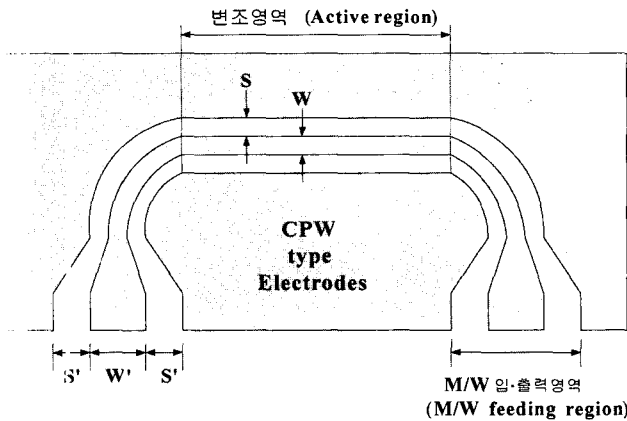


그림 9 CPW 구조 진행파 전극 개략도. W: 변조영역 중앙전극 폭, S: 변조영역 전극사이 간격, W': M/W 입/출력 영역 중앙전극 폭, S': M/W 입/출력 영역 전극사이 간격.

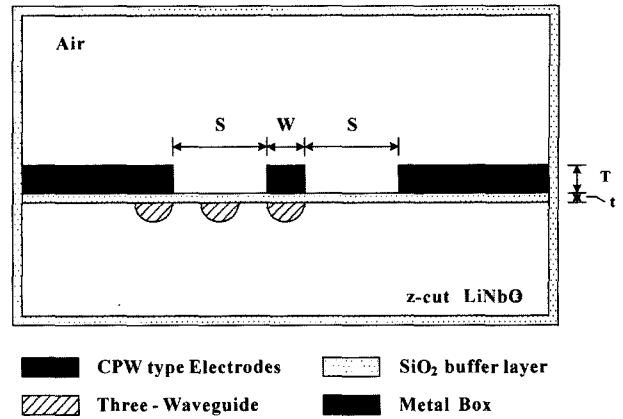


그림 11. CPW 구조 진행파 전극 단면도(변조영역). W: 중앙전극 폭, S: 전극사이 간격, T: LiNbO₃ 두께 t: SiO₂ 두께.

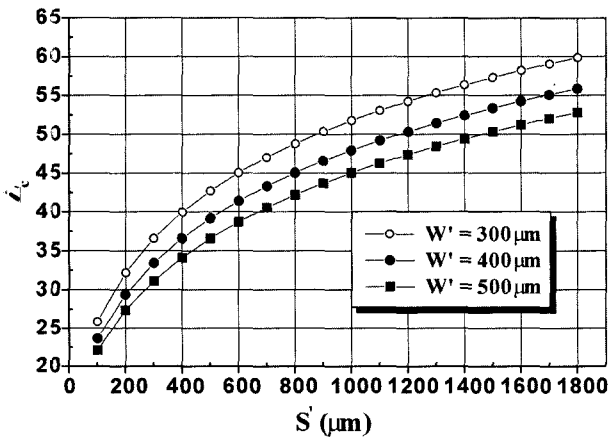


그림 10. 진행파 전극 입/출력 영역에서의 전극 간격(S')에 따른 Z_c. W: 중앙 전극 폭, S': 전극 사이 간격.

입/출력 영역에서는 등각사상법을 이용하여 특성임피던스를 계산하였으며, 이 방법은 전극두께 및 SiO₂ 박막의 두께가 전극 폭 및 전극간격에 비해 무시할 수 있을 만큼 작을 경우, 더욱 정확히 해를 제공한다.

그림 10은 등각사상법으로 해석한 M/W 입/출력 영역에서의 중앙전극 폭(W')을 300 μm, 400 μm, 그리고 500 μm로 변화시켰을 때 중앙 전극사이 간격(S')에 따른 특성임피던스 Z_c 변화를 나타낸 그림이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 중앙전극 폭(W')이 300 μm일 때는 전극사이 간격(S')이 900 μm, 그리고 중앙전극 폭(W')이 400 μm일 때는 전극사이 간격(S')이 1100 μm 부근에서 특성임피던스 Z_c가 50 Ω을 만족하고 있다.

B. 반복이완법 모의 전산에 의한 변조영역 전극설계^[11]

3. CPW 구조 진행파 전극의 설계 파라미터

전극두께 (T)	SiO ₂ 두께 (t)	변조영역		M/W 입/출력영역	
		중앙 전극 폭(W)	전극 사이 간격(S)	중앙 전극 폭(W')	전극 사이 간격(S')
10 μm	1 μm	8 μm	16 μm	300 μm	900 μm

반복이완법은 본 논문에서 설계, 제작하려는 CPW 전극 구조를 quasi-static으로 해석하는 일반적인 방법으로, Laplace 방정식을 유한차분법으로 변환한 뒤 반복적인 과정을 통해 해를 구하는 방법이다.

그림 11에는 본 논문에서 설계, 제작하려는 CPW 구조 진행파 전극 중 변조영역의 단면을 나타내었다. 여기서, Metal Box는 해석영역을 나타내기 위한 그림상의 크기이며, 실제 전극사이의 간격보다 훨씬 멀리 떨어져 있음에 유의하여야 한다.

반복이완법 모의전산을 통해 CPW 전극구조에서의 정전용량을 계산 할 수 있으며, M/W 특성임피던스 Z_c 및 유효굴절률 N_{eff}를 다음과 같이 모두 전극 정전용량의 함수로 표현 할 수 있다.

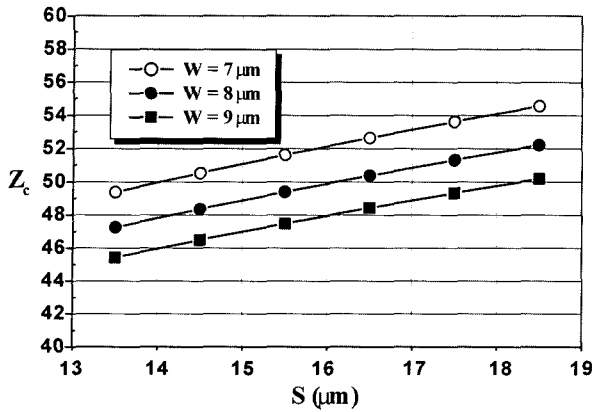
$$Z_c = \frac{1}{c_o \sqrt{C_o C_m}}, \quad N_{eff} = \sqrt{\frac{C_m}{C_o}} \quad (14)$$

여기서 C_o는 그림 11의 CPW 구조 전극내의 유전체(z-cut LiNbO₃, SiO₂ 포함)를 모두 공기로 대체시켰을 때의 정전용량이고, C_m은 원래구조의 정전용량이다. 그리고 c_o는 진공 광전자파의 속도이다.

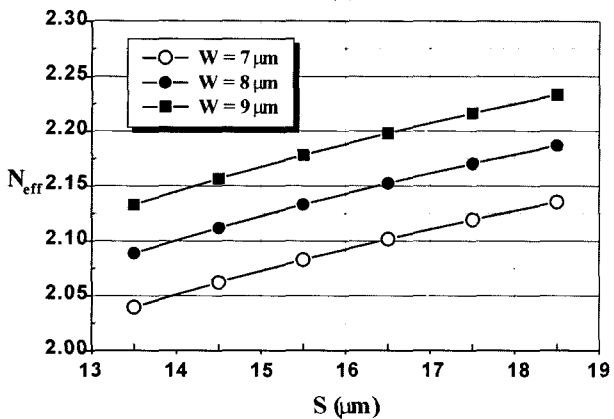
그림 12는 반복이완법 모의 전산에 의해 구해진 CPW 진행파 전극 구조의 변조영역에서 전극사이의 간격(S)에 따른 특성 임피던스 Z_c 및 유효굴절률 N_{eff}를 도시한 것이다. 반복이완법에 의한 모의 전산 시 전극의 두께 T는 10 μm, SiC의 두께 t는 1 μm로 고정하였다

그림 12를 통해 중앙전극 폭(W)이 8 μm일 때와 전극사이 간격(S)이 16 μm일 때 특성임피던스 Z_c와 M/W 유효굴절률이 각각 50 Ω과 2.15에 만족하는 것을 알 수 있다.

표 3에는 등각사상법과 반복이완법등의 모의 전산을 통해 설계된 CPW 구조 진행파 전극의 최종 설계 파라미터를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 12. 변조영역에서 전극 사이 간격 (S)에 따른 Z_c , N_{eff} (a) 특성 임피던스 Z_c , (b) M/W 유효굴절률 N_{eff} , W: 중앙전극 폭, S: 전극사이 간격.

IV. 세 도파로 광변조기 제작 및 측정

4.1. 세 도파로 광변조기 제작

단일 모드 광도파로와 CPW 구조 진행파 전극의 설계 파라미터를 바탕으로 세 도파로 광변조기를 제작하였다.

그림 13은 제작하려는 세 도파로 광변조기의 개략도이다. 그림에서 점선은 진행파 전극 밑에 위치하고 있는 도파로를 나타내며, 광변조기의 변조영역에서 광도파로와 CPW 구조 진행파 전극과의 정렬된 모습을 강조하기 위해 실제 비율과 다소 다르게 나타내었다.

세 도파로 광변조기의 제작은 크게 i) 세도파로 방향성 결합기 제작과 ii) CPW 구조 진행파 전극 제작 그리고 iii) Packaging으로 나누어진다.

먼저, 세 도파로 방향성 결합기 제작을 위하여 Ti를 진공

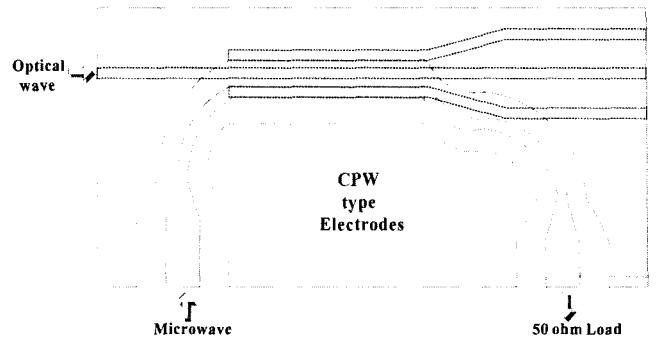


그림 13. 세 도파로 광변조기의 개략도.

열증착(thermal evaporation)방법으로 증착 하였고, 표준사진식판(standard photolithography)으로 Ti 도파로 pattern을 만들었으며, SF6 gas를 이용한 건식식각(Dry-etching) 방법으로 Ti pattern 이외의 Ti를 제거하였다. 마지막으로 도파로 생성을 위해 확산로 안에서 1025°C에서 8시간 동안 내부 확산하였다.

한편, CPW 구조 진행파 전극을 제작하기 위하여 먼저 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)방법으로 SiO₂를 증착 하였고, 진공 열증착법으로 Base metal인 Cr, Au를 차례로 증착 하였다. 두꺼운 진행파전극(10 μm)의 성장을 위하여 전기분해(electroplating) 방법을 사용하였고, 건식식각 방법으로 Base metal인 Au,와 Cr를 식각하였다.

표 4에는 광도파로와 진행파 전극의 제작 파라미터를 정리하였다.

위와 같은 공정 과정을 거쳐 세 도파로 광변조기 Chip을 제작하였다. 그림 14는 제작된 세 도파로 방향성 결합기와 CPW 구조 진행파 전극의 변조영역의 사진이다.

마지막으로, 광변조기 Chip의 광도파로와 fiber와의 index matching 및 bonding의 위하여 UV(Ultra Violet) Epoxy를 이용하여 Pigtail 작업을 수행하였으며, M/W 입/출력 영역의 전극과 M/W Connector와 연결 위하여 황동으로 제작한 Mount를 이용하여 Packaging 하였다.

그림 15에는 Pigtail 작업 후 Mount안에 Packaging 된 변조기 Chip의 사진을 나타내었다.

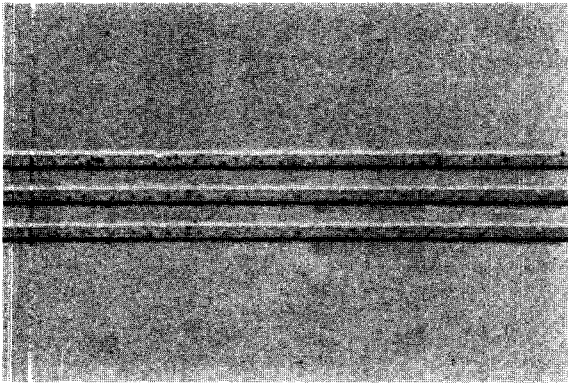
그림 15에서 SMF와 PMF는 각각 Single Mode Fiber 와 Polarization Maintaining Fiber를 나타낸다.

4.2. 제작된 광변조기의 측정

제작된 세도파로 광변조기의 측정은 i) 광도파 측정 및 DC 전압인가 의한 광 스위칭 전압측정과 ii) S-파라미터 측정을 통한 특성임피던스 Z_c 와 M/W 유효굴절률 N_{eff} , 감쇠상수 α_0 등의 진행파 전극 파라미터의 추출, 그리고 iii) M/W 인가에 의한 주파수 응답 $R(\omega)$ 의 측정 등으로 요약 될 수 있다.

표 4. 광도파로와 진행파 전극의 공정 파라미터

	Ti 증착 두께(T)	Ti Strip 폭(W)	확산온도	확산시간
광도파로	900°C	5 μm	1025°C	8 시간
	SiO ₂ 두께(t)	Base metal 두께	Au 전극두께(T)	
진행파 전극	1 μm	Cr: 1000 Å	Au: 1000 Å	10 μm



(a)



(b)

그림 4. 제작된 광도파로와 진행파 전극 (변조영역). (a) 세 도파로 (b) CPW 구조 진행파 전극.

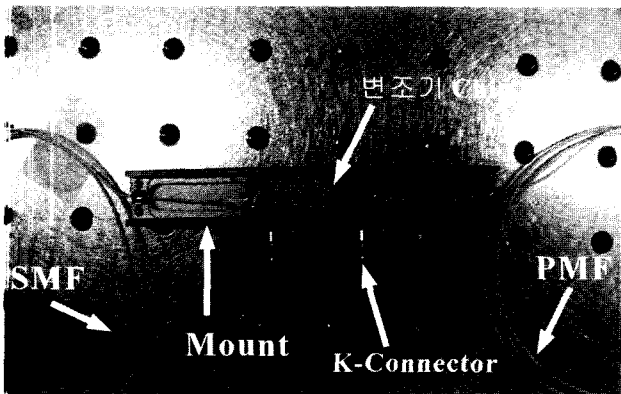


그림 15. Packaging 된 변조기 Chip.

A. 단일 모드 광도파로 측정 및 DC 전압인가에 의한 광 스위칭

Ti 내부 확산 등의 공정을 통해 제작된 단일 모드 세도파로 방향성 결합기의 광도파로 실험을 하기 위한 장치 구성도가 그림 16에 나와 있다.

그림 16과 같이 구성된 광도파로 측정 장치를 통하여 제작된 광도파로가 단일 모드임을 확인하였다. 다음으로 세 도파로 방향성 결합기의 스위칭 전압을 측정하기 위하여 세도파로의 출력단을 Optical Power meter에 연결하였다.

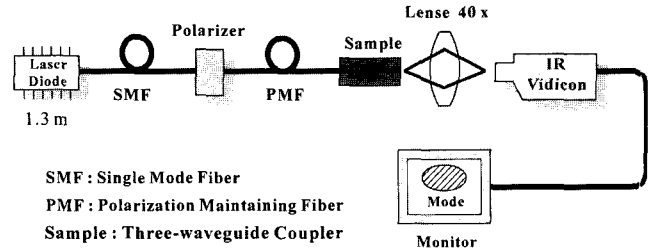


그림 16. 광도파로 측정 장치 구성도.

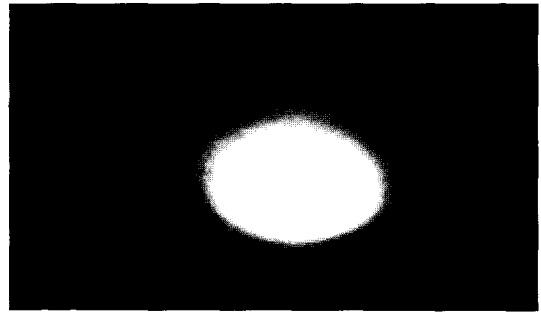


그림 17. 단일 모드 광도파로의 Near field pattern.

그림 17에는 가운데 도파로에 파장 1.3 μm인 광을 입사시키고, 스위칭 전압을 인가하였을 때 IR Vidicon camera 에 찍힌 가운데 도파로 출력단의 Near field pattern을 나타내었다.

광도파로 실험 결과 삽입손실은 약 4 dB, 스위칭 전압은 약 19V로 측정되었다.

B. CPW 진행파 전극의 S 파라미터 측정 및 전극 파라미터 추출^[12,13]

제작된 세도파로 광변조기의 S 파라미터 측정을 위하여 HP8510c Vector Network Analyzer를 사용하였고, K-Connect를 이용하여 광변조기의 M/W Port와 Network Analyzer를 연결하였다. 그림 18은 Network Analyzer로 측정된 M/W 특성 S₁₁의 그래프이다.

그림 18의 S₁₁ 곡선을 통해 전극의 특성 임피던스 Z_c는 45 Ω로 계산되었으며, 설계한 50 Ω과 차이를 보이고 있으며 M/W 유효굴절률 N_{eff} 역시 평균 2.20로 설계된 2.15와 차이를 보이고 있다. 이는 진행파 전극 제작시의 공정오차로 인한 전극의 크기변화와 전극의 입/출력영역과 K-Connector와의 연결 불량, 그리고 변조영역의 중앙 전극(W)과 M/W 입/출력영역의 중앙전극(W)을 연결하는 Taper 영역에서의 M/W 투과 특성이 주요한 원인이라고 추정된다. 참고로 이상적인 전극의 S₁₁ 곡선은 인가된 M/W 주파수가 증가하더라도 -20 dB 이하에서 Peak와 Deep을 반복하게 된다.

그림 19에는 측정된 M/W 투과 특성을 나타내었다.

그림 19의 M/W 투과특성 S₂₁를 통해 주파수에 따라 차이는 있지만 감쇠상수 α₀는 평균 0.055/cm√GHz로 추정되었다.

표 5에는 진행파 전극의 S 파라미터 측정을 통해 추출한 전극 파라미터를 정리하였다.

표 5와 같이 추출된 진행파 전극 파라미터들을 이용하여

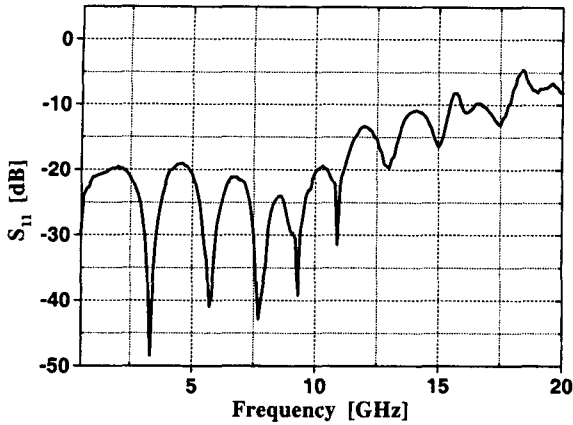


그림 18. M/W 반사특성 S_{11} .

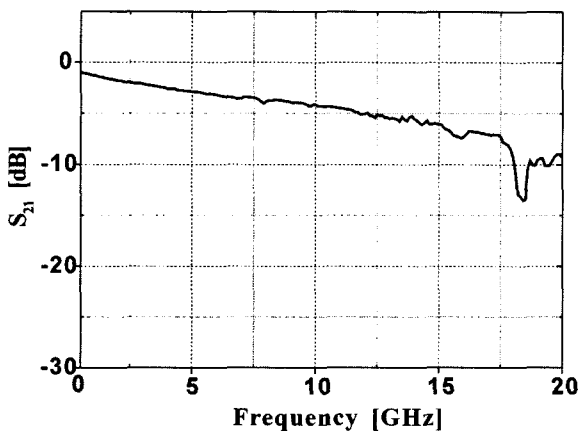


그림 19. M/W 투과특성 S_{21} .

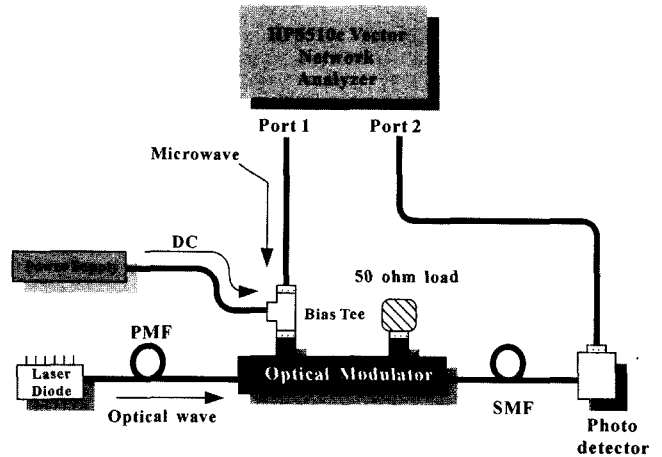


그림 20. 주파수 응답 $R(\omega)$ 측정 장치 구성도.

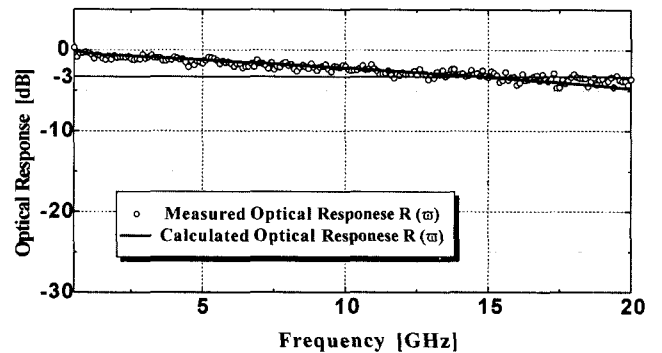


그림 21. 세 도파로 광변조기의 주파수 응답 $R(\omega)$

른 적인 주파수 응답 $R(\omega)$ 를 계산할 수 있으며, 계산된 주파수 응답 $R(\omega)$ 는 M/W 인가에 의한 주파수 응답 $R(\omega)$ 측정 시에 비교하도록 하겠다.

C. Microwave 신호 인가에 따른 광변조도 측정

M/W 인가에 의한 광변조도 측정은 Network Analyzer와 Photo Detector 를 이용하여 측정 하였으며, 그 측정 방법의 개략도를 그림 20에 도시하였다.

그림 20에 도시한 바와 같이 Network Analyzer의 Port 1 으로 부터 인가된 M/W는 Power Supply에서 인가된 DC 스위칭 전압과 함께 Bias Tee를 거쳐 제작된 광변조기의 진행파 전극으로 인가되며, 이때 인가된 M/W는 전극 밑의 광도파로를 따라 진행하는 도파광을 변조시킨 후 50 Ω load에 termination된다. 또한, 변조된 도파광은 Photo Detector에 의해 M/W로 변환되어 Network Analyzer의 Port 2로 입력되게 된다. 이러한 측정을 통해 추출된 S'_{21} 은 상대적인 주파수 응답을 의미한다. 그림 21에는 그림 20과 같은 방법으로 측정된 주파수 응답 S'_{21} 을 나타내었다.

표 5. 진행파 전극 파라미터

전극 Parameter	특성임피던스 Z_c	M/W 유효굴절률 N_{eff}	감쇠상수 α_0
추출된 값	45 Ω	2.20	0.055/cm \sqrt{GHz}

그림 21에서 실선은 앞선 S 파라미터 측정시 추출한 진행파 전극 파라미터에 의해 이론적으로 계산된 주파수 응답 $R(\omega)$ 곡선이며, 작은 원은 PD에 의해 측정된 주파수 응답 $R(\omega)$ 곡선을 나타낸다.

측정된 광 주파수 응답 곡선은 이론적으로 계산한 주파수 응답곡선과 매우 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며, 그림 21을 통해 제작된 광변조기의 3 dB 변조역폭은 측정치와 이론치 모두 13 GHz 이상임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 방향성 결합기와 CPW 구조 진행파 전극으로 구성된 광변조기를 설계 제작하였다. 세 도파로 방향성 결합기의 결합길이는 일반적인 두 도파로 방향성 결합기의 결합 길이의 $1/\sqrt{2}$ 배만큼 짧기 때문에 진행파 전극 등을 장착하여 광변조기등의 능동소자로 이용할 경우 더 넓은 변조 대역폭을 예상 할 수 있다. 이러한 세 도파로 방향성 결합기의 장점을 이용하여 고속 변조에 적합한 진행파 광 변조기를 설계, 제작하였다.

먼저, 결합모드 이론을 이용하여 세 도파로 방향성 결합기의 광결합 현상을 해석하였으며, 유한차분법을 이용하여 단일 모드만을 갖는 Ti:LiNbO₃ 광도파로를 설계하였고, 광 결합길이를 계산하였다. 한편, CPW 구조 진행파 전극의 M/W 입/출력 영역의 설계는 등각사상법을 이용하였으며, 변조 영역의 설계에는 반복이완법을 이용하여 특성임피던스 Z_c 와 M/W 유효 굴절률 N_{eff} 정합조건을 동시에 만족하는 설계 파라미터를 구하였다.

광도파로 제작을 위해서 진공열증착, 표준사진식판법, Ti 내장 확산 등의 반도체 공정을 이용하였으며, SiO₂ 완충박막과 전극과 전극의 성장을 위하여 각각 PECVD와 전기분해 공정을 사용하였다.

제작된 광변조기의 삽입손실과 스위칭 전압은 약 4 dB와 100V였으며, Network Analyzer를 통하여 측정된 S 파라미터로부터 특성임피던스 $Z_c=45$, M/W 유효굴절률 $N_{eff}=2.20$, 그리고 감쇠상수 $\alpha_o=0.055/\text{cm}\cdot\sqrt{\text{GHz}}$ 등의 진행파 전극 파라미터를 추출하였다. 특성임피던스와 M/W 유효굴절률, 그리고 감쇠상수 등이 설계된 것과 다르게 나타난 이유로는 M/W Port의 진행파 전극간의 Bonding시 사용한 Silver Paste 불량, Network Analyzer와 진행파 전극 Mount의 Connector 부정합, 불균형하게 성장한 Au 전극 표면의 거칠기, 그리고 전극 제작 시 발생한 중앙 전극 폭(W)과 전극사이 간격(S)의 공정 오차 등으로 추정된다.

전극 파라미터에 의해 계산된 주파수 응답 $R(\omega)$ 곡선과 광결합기를 이용하여 측정된 주파수 응답 $R(\omega)$ 곡선은 서로 유사한 모습으로 나타났으며, 3dB 변조대역폭은 두 가지 경우 모두 13CHz 이상을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 학술진흥재단의 선도연구자사업에 의하여 지원되었음(KRF 2001-041-E00160).

참고문헌

[1] H. Ogiwara, "Optical waveguide 3x3 switch : Theory of tuning and control," *Appl. Opt.*, vol 18, no. 4, pp. 510-515, Feb. 1979.
 [2] H. A. Haus and C. G. Fonstad, "Three-waveguide couplers

for improved smapling and filtering," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 12, pp. 2321-2325, Dec. 1981.
 [3] S. Ruschin and E. Marom, "Coupling effects in symmetrical three-guides structures," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 1, no. 11, pp. 1120-1128, Nov. 1984.
 [4] 임영준, 김창민, "세도파로 광스위치의 설계 규칙," 전자공학회논문지, 제33권 A편, 제6호, pp. 197-205, 1996년 6월.
 [5] J. P. Donnelly, N. L. Demeo, and G. A. Ferrante, "Three-guide optical couplers in GaAs," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-1, no. 2, pp. 417-424, June 1984.
 [6] A. N. Kaul, K. Thyagarajan, and A. Kumar, "Coupling characteristics of a three channel waveguide directional coupler," *Optical Commun.*, vol. 56, no. 2, pp. 95-99, 1985.
 [7] K. Iwasaki, S. Kurazono, and K. Itakuna, "The coupling of modes in three dielectric slab waveguides," *Electron. Commun. Japan*, vol. 58-C, no. 8, pp. 100-108, 1975
 [8] K.-L. Chen and S. Wang, "The crosstalk in three-waveguide optical directional couplers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 7, July 1986.
 [9] C. M. Kim and R. V. Ramaswamy, "Overlap integral factors in integrated optic modulators," *IEEE J. Lightwave Technol.* vol. LT-7, no. 7, pp. 1063-1070, July 1989. (supported by U.S. Navy)
 [10] K. C. Gupta *et al.*, Microstrip line and Slotline, Artech House, pp. 257-301. 1979.
 [11] 정석원, 김창민, "진행파 광변조기의 Taper영역 전극 설계 : SOR기법," 한국광학회 논문지, 제7권, 제 1호, pp. 78-86. 1996년 3월.
 [12] 한영탁, 이우진, 고병국, 이병권, 김창민 "Mach-Zender 간섭기를 이용한 진행파 Ti:LiNbO₃ 광변조기" 대한전자공학회지 논문지, 2001년 11월.
 [13] 이우진, 김경암, 김우경, 김창민 "m-section의 전극반전이 있는 Mach-Zehnder형 진행파 Ti:LiNbO₃ 광변조기," 대한전자공학회 논문지, 제 39권 SD편 제 7호 pp. 26-36 2002년 7월.
 [14] 김영문, 서정훈, 이세호, 허창열, 김창민, "바깥도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광 스위치의 설계 및 제작," 대한전자공학회 논문지, 제 36권 D편, 제 6호, pp. 539-548, 1999년 6월.
 [15] 허창열, 한영탁, 김창민, "가운데도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광 스위치의 설계 및 제작," 대한전자공학회 논문지, 제 37권 D편, 제 6호 , pp. 64-71, 2000년 6월.

Traveling-wave Ti:LiNbO₃ optical modulator capable of complete switching

Jae-Gon Gwak[†], Kyoung-Am Kim, Young-Moon Kim, Eun-Joo Jung, Joong-ho Pi,
Kwon-Dong Park, and Chang-Min Kim

Dept. of Electronics Engineering, The University of Seoul, Jeonnong-dong 90, Dongdaemun-ku 130-743, KOREA

[†]E-mail: 76pluto@hanmail.net

(Received June 5, 2003, Revised manuscript August 19, 2003)

Design of the optical modulator composed of a three-waveguide coupler and CPW traveling-wave electrodes was carried out. Switching phenomena of three-waveguide couplers were analyzed by using the coupled mode theory, and the coupling-lengths of the devices were calculated by means of the FDM. CPW traveling-wave electrodes were analysed by the CMM and SOR simulation technique in order to find the conditions of phase-velocity and impedance matching. Traveling-wave modulators were fabricated on z-cut LiNbO₃ substrate. Ti was in-diffused in LiNbO₃ to make waveguides and Au electrodes were built on the waveguides by the electrolyte technique. The fabricated modulator chip was end-polished, pig-tailed and packaged in a brass mount with K-connector. The insertion loss and the switching voltage of the optical modulator were about 4dB and 19V, respectively. Network analyzer was used to obtain the S parameter and the corresponding RF response. From the measurement, parameters of the traveling-wave electrodes were extracted to be $Z_c = 45 \Omega$, $N_{eff} = 2.20$, and $\alpha_o = 0.055/\text{cm} \sqrt{\text{GHzz}}$. The measured optical response $R(\omega)$ was compared with the theoretically estimated one, showing both responses agree well. The measurement results revealed that 3dB bandwidth turned out to be about 13 GHz.

OCIS Code : 250.7360.