

Ti:LiNbO₃ 세 도파로형 진행파 광변조기; 바깥입사, 반대칭 Detuning

이우진[†]

한국전자통신연구원 기반기술연구소 광접속모듈팀
Ⓣ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

정은주 · 피중호 · 김창민

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
Ⓣ 130-743 서울시 동대문구 전농동 90번지

(2004년 4월 20일 받음, 2004년 7월 12일 수정본 받음)

Ti:LiNbO₃ 세 도파로형 광도파로와 CPW 진행파 전극으로 구성된 고속 외부 광변조기를 설계, 제작하였다. 결합모드 이론을 이용하여 세 도파로 광결합기의 스위칭 현상을 해석하였으며, 유한차분법을 이용하여 결합길이를 계산하였다. SOR에 의해 위상속도 및 특성 임피던스 정합 조건이 만족되도록 CPW 진행파 전극의 파라미터를 설계하였다. 제작된 소자의 dc 스위칭 및 전극의 RF 특성을 측정하였다. 제작된 세 도파로 광변조기의 삽입손실과 스위칭 전압은 약 4 dB와 15.6 V였다. RF 특성을 얻기 위하여 회로분석기(Network Analyzer)를 이용하여 진행파 전극의 S 파라미터를 측정하였다. 측정 결과 진행파 전극의 특성임피던스 $Z_c = 39.2\Omega$, M/W(Microwave) 유효굴절률 $N_{eff} = 2.48$, 그리고 감쇠상수 $\alpha_m = 0.0665/cm\sqrt{GHz}$ 등의 파라미터를 추출하였다. 추출된 진행파 전극 파라미터를 이용하여 이론적인 주파수 응답 $R(\omega)$ 을 계산하였으며, 광 검출기로 측정된 주파수 응답 $R(\omega)$ 과 비교하였다. 주파수 응답 측정 결과, 3 dB 변조대역폭은 13 GHz로 측정되었다.

주제어 : Optical modulator, Three-waveguide directional coupler, Ti:LiNbO₃ waveguide, CPW traveling-wave electrodes.

I. 서 론

대용량 정보 전송을 가능케 하는 광통신의 발전이 눈에 띄게 가시화 되고 있다. 이에 따라 초고속, 광대역 광통신 시스템과 신호처리 시스템에서 고속 광변조기가 필수 소자로서 대두되고 있으며, dc drift가 제어 가능한 수준으로 충분히 억제되기 때문에 Ti:LiNbO₃ 외부 변조기가 주종을 이루고 있다.^[1-13] 또한, Ti:LiNbO₃ 외부 변조기는 진행파 전극을 사용해서 초고속 변조가 가능하고, 광파이버를 광도파로에 효과적으로 직접 결합시킬 수 있는 이점을 갖고 있다.

진행파 전극을 이용한 광변조기의 대역폭은 마이크로파와 광파 사이의 위상속도 부정합과 특성임피던스 부정합, 전극의 전파손실에 의해 제약을 받는다. 위상속도 정합을 얻는 유효한 방법은 전극 주위를 유전율이 낮은 물질로 대체하는 것이다.^[5-8] 현재까지 위상속도 정합을 얻기 위한 구조로 광도파로 사이의 기판에 groove를 만들고^[5], SiO₂ 완충막을 식각하거나^[6], 전극의 두께를 높이는 방법^[7], 그리고 실드 판을 전극 위에 얹는 방법^[8]들이 연구되어왔다. 또한 임피던스 정합을 위해 광도파로를 ridge 구조로 만들고, 전극의 두께를 높이는 방법이 연구되었다.^{[10][13]}

광변조기에 이용되는 방향성 결합기의 구조로는 두 도파로 방향성 결합기(Directional Coupler)^[1-4], Y-분기형이 연구되었

다. 최근 들어 두도파로 방향성 결합기를 대신해 세도파로 방향성 결합기가 광 분파기/합파기, 광 스위치, 광 sampler 등의 분야에서 많은 연구가 있어 왔으나, 광변조기 소자로서의 연구는 보고 된 바가 없다.

본 논문에서는 10 GHz 이상의 변조 대역폭을 갖도록 Ti:LiNbO₃ 세 도파로형 광도파로와 CPW(Coplanar Waveguide) 구조의 진행파 전극으로 구성된 고속 외부 광변조기를 설계, 제작하였다.

세 도파로 방향성 결합기의 스위칭 현상을 해석하는 방법으로 정상 모드 이론(Normal Mode Theory)과 결합 모드 이론이 있으며, 본 논문에서는 결합 모드 이론을 이용하여 스위칭 현상을 해석하였다. 스위칭 해석은 크게 광이 어떤 도파로로 입사하느냐에 따라 i) 바깥도파로 입사와 ii) 가운데 도파로 입사로 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 바깥 도파로에 광을 입사시키고, 양쪽 옆의 도파로에 전압을 인가하여 굴절률을 반대칭 시킨 구조의 광결합 현상을 해석하였다.

광변조기의 제작 과정은 다음과 같다. z-cut LiNbO₃ 기판 상에 표준석판법에 의하여 광결합기 Ti 패턴을 뜬 후, 700 Å 두께의 Ti를 1050°C에서 8시간 동안 내부 확산시킨다. 1

[†] E-mail: lwj@etri.re.kr

μm 두께의 SiO₂ 완충 박막을 형성시킨다. 그 위에 CPW 진행파 전극구조의 전극을 올린다. 제작된 광변조기는 Network Analyzer와 광 검출기 등을 이용하여 전극 파라미터 추출과 주파수 응답 R(ω)를 측정하였다.

II. 세 도파로 결합기의 광 스위칭 이론

2.1. 세 도파로 결합모드 방정식

(Three-waveguide Couple mode Theory)^[17,18]

세 도파로 방향성 결합기의 광 스위칭을 결합 모드로 해석한 세 도파로 결합 모드 방정식은 다음과 같이 기술되어 진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1(z) &= -jx_1 A_2(z) e^{i\Delta\beta_1 z} \\ \frac{d}{dz} A_2(z) &= -jx_1 A_1(z) e^{-i\Delta\beta_1 z} - jx_3 A_3(z) e^{-i\Delta\beta_3 z} \\ \frac{d}{dz} A_3(z) &= -jx_3 A_2(z) e^{i\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 A_i (i=1, 2, 3)는 각 도파로를 따라 진행하는 전계의 크기를 나타내며, x_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, β_i (i=1, 2, 3)는 각 도파로의 전파상수이다.

그림 1과 같이 동일한 구조와 등 간격을 갖는 세 도파로에 대하여 논의하기로 하자.

그림 1에서 n_g, n_s는 각각 광도파로의 굴절률과 기판의 굴절률을 나타낸다. 세 도파로가 동일한 구조를 가지며, 등 간격으로 놓여져 있기 때문에 결합계수 x는 x₁ = x₃ = x로 놓을 수 있다.

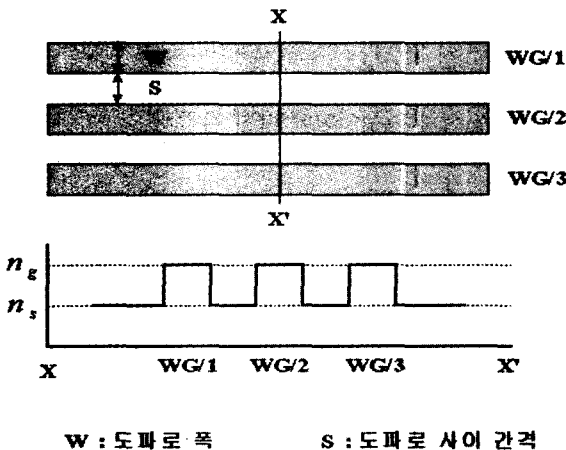


그림 1. 동일 구조와 등 간격을 가지는 세 도파로의 굴절률 분포.

식 (1)의 미분 방정식을 풀기 쉬운 형태로 만들기 위해 다음과 같이 치환을 하기로 하자.

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

이후의 해석 결과는 [17,18]을 참조한다.

2.2. 스위칭 해석

그림 2는 세 도파로 방향성 결합기의 스위칭 현상을 설명하기 위한 그림이며, 또한 최종적으로 제작하려는 세도파로 광변조기의 변조영역(Active region)에 해당하는 그림이다.

그림 2에서 보여주는 바와 같이 바깥 도파로(WG/1)에 입사된 광이 어떻게 다른 도파로로 완전히 이행되는지 알아보기로 한다.

광 스위칭 현상을 해석하는데 있어 그림 2와 같이 처음 광이 입사된 도파로에서 다른 도파로로 광이 완전히 전달되는 경우를 ⊗상태(cross-state)로 나타내기로 하고, 광이 입사된 도파로로 다시 출력되는 경우를 ⊖상태(bar-state)로 나타내기로 한다. 초기 조건은 다음과 같다.

$$a_1 = 1, \quad a_2 = 0, \quad a_3 = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (4)$$

A. 전극에 전압이 인가되지 않은 경우

그림 2의 도파로 위에 위치하고 있는 전극에 전압을 인가하지 않을 경우 도파로의 굴절률 변화는 없으며, 해는 다음과 같이 나타내어진다.^[17,18]

$$\begin{aligned} a_1(z) &= \frac{1}{2} (\cos(\sqrt{2}xz) + 1) \\ a_2(z) &= -\frac{j}{\sqrt{2}} \sin(\sqrt{2}xz) \\ a_3(z) &= \frac{1}{2} (\cos(\sqrt{2}xz) - 1) \end{aligned} \quad (5)$$

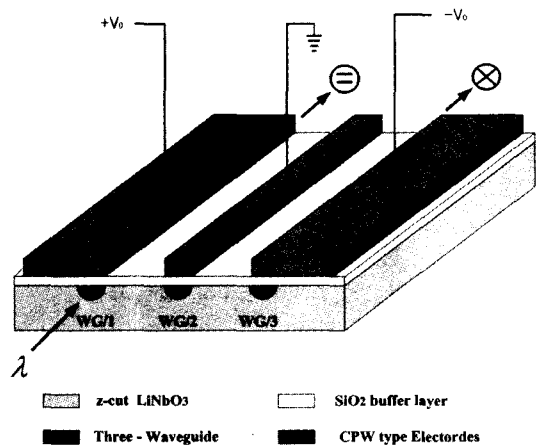


그림 2. 광이 바깥 도파로에 입사되는 경우의 스위칭.

입사된 광이 다른 도파로로 완전히 이행(⊗상태) 되기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_2 a_2^* = 0, \quad a_3 a_3^* = 1 \quad \text{at } z=L \quad (6)$$

식 (6)은 다음의 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m-1) \frac{\pi}{2\sqrt{2}\alpha} = (2m-1)l_{cl}, \quad m=1,2,\dots \quad (7)$$

식 (7)에서 $m=1$ 일 때, 처음으로 ⊗상태가 되며, 따라서 결합 길이는 다음과 같다.

$$l_{cl} = \frac{\pi}{\sqrt{2}\alpha} = \sqrt{2}l_c \quad (8)$$

식 (8)에서 $l_c (= \pi/2\alpha)$ 는 대칭적인 두 도파로 결합기의 결합 길이이다. l_{cl} 의 아래첨자 1는 광이 입사된 도파로의 번호를 나타낸다.

한편 도파로 1에 입사된 광이 다시 도파로 1로 되돌아오기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = 1, \quad a_2 a_2^* = a_3 a_3^* = 0 \quad \text{at } z=L \quad (9)$$

식 (9)은 다음과 같은 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m) \frac{\pi}{2\sqrt{2}\alpha} = 2ml_{cl}, \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (10)$$

B. 전극에 전압이 인가된 경우

그림 2와 같이 도파로 위에 위치하고 있는 전극에 전압을 인가해 주면 굴절률은 반 대칭적으로 변화된다. 이 경우에는 식 (11)을 사용하여 해석되어진다.^[17,18]

$$\begin{aligned} a_1(z) &= \left(1 - \frac{x^2}{x'^2}\right) \cos x'z - j \frac{\Delta\beta}{x'} \sin x'z + \frac{x^2}{x'^2} \\ a_2(z) &= -j \frac{x}{x'} \sin x'z + \frac{x\Delta\beta}{x'^2} (\cos x'z - 1) \\ a_3(z) &= \frac{x^2}{x'^2} (\cos x'z - 1) \end{aligned} \quad (11)$$

바깥 도파로로 입사된 광이 다른 도파로로 완전히 이행되기 위한 조건(⊗상태)은 식 (6)이 만족되어야 하는데, 이를 만족하는 해는 존재하지 않는다. 도파로 1에 입사된 광이 다시 도파로 1로 되돌아오기 위해서 조건(⊖상태)은 식 (9)가 만족되어야 하며, 다음의 해를 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\Delta\beta^2 + 2x^2}L = 2m\pi \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (12)$$

식 (12)은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{cl}}\right)^2 = (2m)^2 \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (13)$$

식 (7), (10), (13)의 스위칭 조건을 그림 3의 스위칭 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

그림 3에서 S₁은 스위칭이 처음 일어나는 경우를 나타내고 있으며 S₂는 스위칭이 두 번째로 일어나는 경우를 나타낸다. 이와 같이 ⊗상태가 되도록 하는 전압과 ⊖상태가 되도록 하는 전압이 항상 존재하므로 정확한 결합길이 L/l_{cl} 가 요

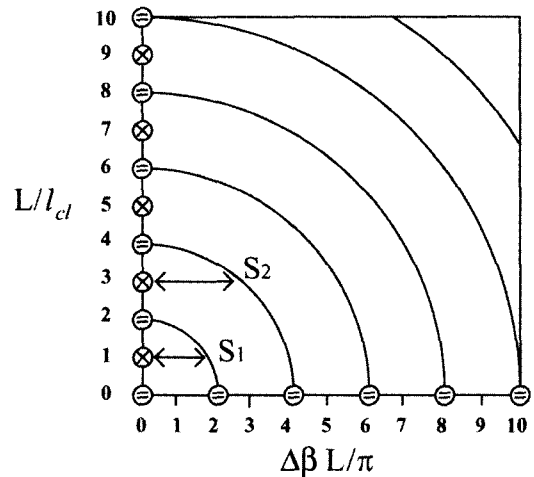
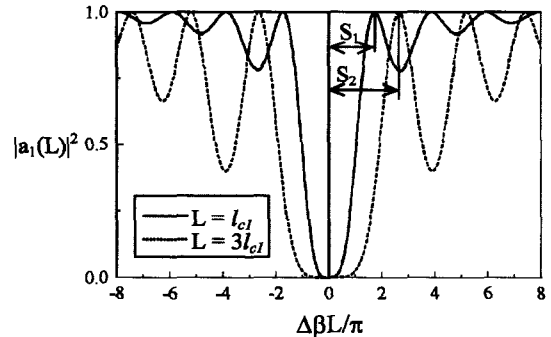
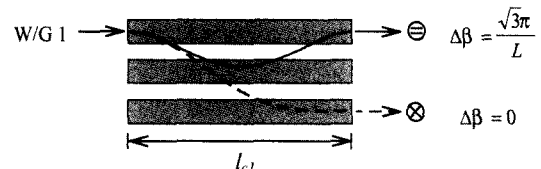


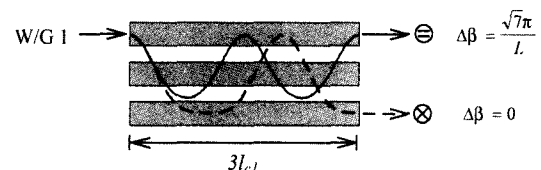
그림 3. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭 다이어그램.



(a) 도파로 1의 출력 파워 변화



(b) $L = l_{cl}$ 일때, 스위칭 동작



(c) $L = 3l_{cl}$ 일때, 스위칭 동작

그림 4. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭 동작.

구되지 않으며, 단지 공급되는 전압의 변화만으로도 완전한 스위칭 동작이 가능하게 된다.

그림 4(a)는 도파로 1의 출력 파워의 변화이며, 그림 4(b)는 $L = l_{c1}$ 에 대한 스위칭 동작을 보여주고 있다.

그림 2의 광 스위치 구조는 두개의 π -shift된 source가 필요하고, 기존 방향성 결합기에 비하여 결합길이가 $\sqrt{2}$ 배 늘어나는 구조적 단점을 보이고 있다. 그러나 한편 스위칭을 위한 인가 전압은 오히려 $1/\sqrt{2}$ 로 낮아지는 장점이 있으며, 또한 광 입,출력단이 분리되어 광 스위칭의 중요한 평가지수인 소광비(extinction ratio)의 측면에서 볼 때 유리한 점을 지니고 있다.

III. 세 도파로 결합기 및 진행파 전극 설계

3.1. Ti:LiNbO₃ 광도파로 및 결합기 설계

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 파라미터 및 공정 조건은 다음의 표 1과 같다.

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.

$$l_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} = \frac{\lambda}{2(N_e - N_o)} \quad (14)$$

식 (14)에서 β_e, β_o 는 각각 even 모드와 odd 모드의 전파 상수를 나타내며, N_e, N_o 는 even 모드와 odd 모드에서의 모드 굴절률을 나타낸다.

광이 바깥 도파로로 입사될 경우 세 도파로 방향성 결합기의 결합길이는 식 (15)과 같다.

$$l_{c1} = \sqrt{2} l_c \quad (15)$$

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

LiNbO ₃ 기판	파장(μm)	Ti strip 폭(μm)	Ti 두께(A)	확산 온도($^{\circ}\text{C}$)	확산 시간(h)
z-cut	1.3	5	700	1050	8

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

표 2. 두 도파로 방향성 결합기의 결합길이

W_1	S	W_2	even 모드 굴절률 N_e	odd 모드 굴절률 N_o	결합길이	
					l_c	l_{c1}
5 μm	6 μm	5 μm	2.15304	2.15298	9744 μm	13780 μm

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

이와 같은 설계 파라미터를 바탕으로 설계된 세 도파로 방향성 결합기의 설계 치수를 그림 5에 보였으며, 이는 광도파로 제작시의 Ti Strip의 치수와 같다.

3.2. CPW 구조 진행파 전극 설계

M/W가 입·출력 영역(M/W feeding region) 및 변조영역까지 신호의 왜곡 및 반사손실 없이 전달되기 위해서는 광변조기의 feeding영역, 변조영역 전체에 걸쳐 특성임피던스 정합이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 입·출력단에서의 특성임피던스 설계는 등각사상법(Conformal Mapping Method)을 사용하였고, 변조영역에서의 특성임피던스 정합과 M/W 유효굴절률 N_{eff} 정합 설계는 반복이완법(Successive Over-Relaxation)을 이용하였다.

A. 등각사상법에 의한 입·출력단의 전극설계

입·출력단 영역은 M/W port와 직접 연결되는 곳으로 결합을 쉽게 하기 위해서 대체로 약 300 μm 이상이 되어야 한다. 그림 6은 입·출력단 영역의 전극 구조를 설명하기 위한

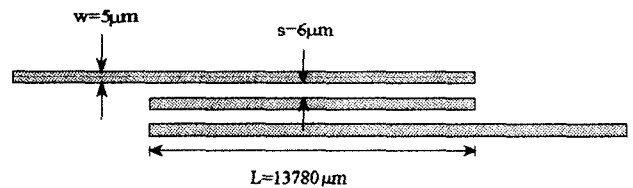


그림 5. 세 도파로 방향성 결합기의 설계 치수.

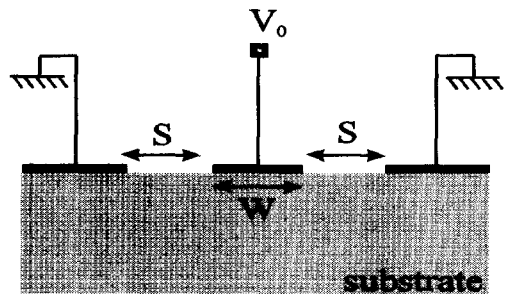


그림 6. LiNbO₃ 기판에 형성된 전극 구조

그림이다.

중앙전극 폭(W) 및 전극간격(S)은 전극두께 및 SiO₂ 박막의 두께에 비해 대단히 크므로 SOR 적용시 방대한 양의 메모리리와 계산시간이 소요되고 그 정확성도 신뢰할 수가 없게 된다. 이러한 이유로 입·출력단에서는 등각사상법을 이용하여 특성임피던스를 계산하였으며, 이 방법은 전극 두께 및 SiO₂ 박막의 두께가 전극 폭 및 전극간격에 비해 무시할 수 있을 경우, 더욱 정밀도를 제공한다.

그림 7은 등각사상법으로 해석한 M/W 입·출력단에서 중앙전극 폭(W)을 300 μm, 400 μm, 그리고 500 μm로 변화시켰을 때 중앙 전극사이 간격(S)에 따른 특성임피던스를 계산한 것이다.

그림 7에서 보는 바와 같이 중앙전극 폭(W)이 300 μm에서는 전극사이 간격(S)이 900 μm, 그리고 중앙전극 폭(W)이 400 μm일 때는 전극사이 간격(S)이 1100 μm 부근에서 특성 임피던스 Z_c가 50 Ω을 만족하고 있다.

B. 반복이완법에 의한 active 영역의 전극 설계¹⁴⁾

반복이완법(Successive Over Relaxation)은 CPW 전극구조를 quasi-static(유사 TEM)으로 해석하는 한 방법으로 Laplace 방정식을 유한차분법으로 변환한 뒤 반복적인 과정을 통해 해를 구하는 방법이다.

이 방법을 이용하여 그림 8에서와 같이 전극이 유한한 두께를 가지고 있는 구조에 대해서 쉽게 해석할 수 있다. Metal box는 그림과는 달리 전극 gap들로부터 훨씬 멀리 떨어진 곳에 위치하여야 하며, 이는 해석 영역의 범위를 의미한다.

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

$$Z_c = \frac{1}{c_0 \sqrt{C_o C_m}}, \quad N_{eff} = \sqrt{\frac{C_m}{C_o}} \quad (16)$$

여기서 C_o는 그림 8에 CPW 구조 전극내의 유전체(z-cut

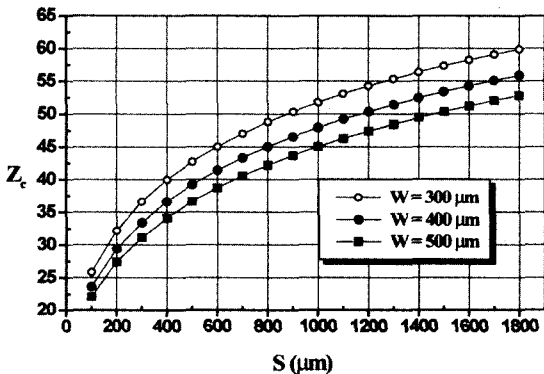


그림 7. 전극간격(S)에 따른 입·출력단에서의 Z_c.

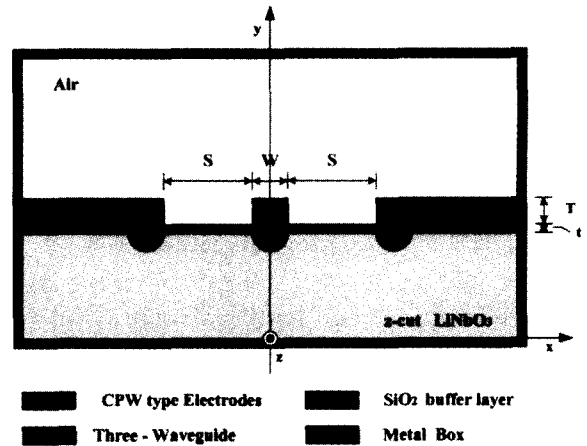


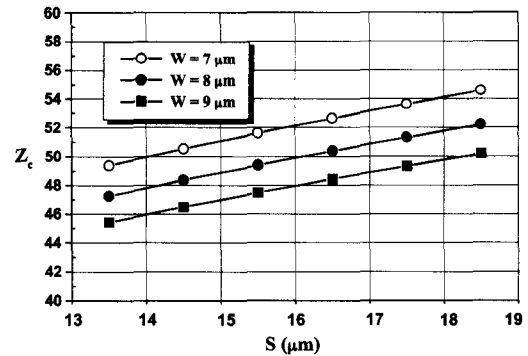
그림 8. 진행파 CPW 구조 전극 단면(변조영역)

T: 전극두께, t: SiO₂ 두께.

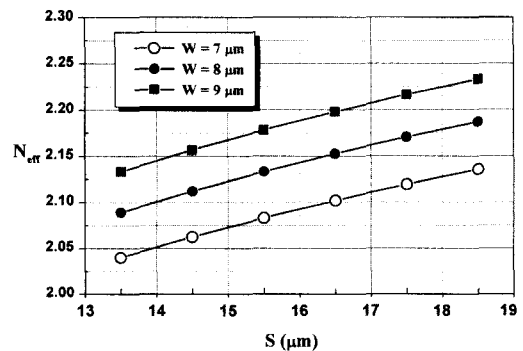
z-cut LiNbO₃ : ε_x=43, ε_y=28, SiO₂ 박막 굴절률 : n=1.45

LiNbO₃, SiO₂ 포함)를 모두 공기로 대체시켰을 때의 정전용량이고, C_m은 원래구조의 정전용량이다. 그리고 c_o는 진공 중 전자파의 속도이다.

그림 9는 반복이완법 모의전산에 의해 구해진 CPW 진행



(a) 특성 임피던스 Z_c



(b) M/W 유효굴절률 N_{eff}

그림 9. 변조영역에서 전극 사이 간격(S)에 따른 Z_c, N_{eff} (W : 중앙전극 폭, S : 전극사이 간격)

파 전극 구조의 변조영역에서 전극사이의 간격(S)에 따른 특성 임피던스 Z_c 및 유효굴절률 N_{eff} 를 도식한 것이다. 반복이완법에 의한 모의 전산 시 전극의 두께 T는 $10 \mu m$, SiO_2 의 두께 t는 $1 \mu m$ 로 고정하였다

그림 9를 통해 중앙전극 폭(W)이 $8 \mu m$ 일 때와 전극사이 간격(S)이 $16 \mu m$ 일 때 특성임피던스 Z_c 와 M/W 유효굴절률 N_{eff} 가 각각 50Ω 과 2.15에 만족하는 것을 알 수 있다.

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

표 3. CPW 구조 진행파 전극의 설계 파라미터

전극 두께 (T)	SiO_2 두께 (t)	변조영역		M/W 입/출력영역	
		중앙 전극 폭(W)	전극사이 간격(S)	중앙 전극 폭(W)	전극사이 간격(S)
$10 \mu m$	$1 \mu m$	$8 \mu m$	$16 \mu m$	$300 \mu m$	$900 \mu m$

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 10은 세 도파로 광결합기와 CPW형 전극 구조의 진행파 광변조기가 그려져 있고, 본 논문에서 최종적으로 제작하려는 세 도파로 광변조기의 개략도이다.

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

먼저, 세 도파로 방향성 결합기 제작을 위하여 Ti 를 진공 열증착(thermal evaporation)방법으로 증착 하였고, 표준사진식판(standard photolithography)으로 Ti 도파로 pattern을 만들었으며, SF_6 gas를 이용한 건식식각(Dry-etching) 방법으로 Ti pattern 이외의 Ti를 제거하였다. 마지막으로 도파로 생성을 위해 확산로 안에서 $1050^\circ C$ 에서 8시간 동안 내부 확산하였다.

한편, CPW 구조 진행파 전극을 제작하기 위하여 먼저 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)방법으로 SiO_2 를 증착 하였고, 진공 열증착법으로 Base metal 인 Cr, Au를 차례로 증착 하였다. 두꺼운 진행파전극($10 \mu m$)의 성장을 위하여 전기분해(electroplating) 방법을 사용하였고, 건식식각 방법으로 Base metal인 Au와 Cr를 식각하였다.

표 4에는 광도파로와 진행파 전극의 제작 파라미터를 정리하였다.

위와 같은 공정 과정을 거쳐 세 도파로 광변조기 Chip을 제작하였다. 그림 11은 제작된 세 도파로 방향성 결합기와 CPW 구조 진행파 전극의 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 12에는 Pigtail 작업 후 Mount 안에 Packaging 된 변조기 Chip 의 사진을 나타내었다.

4.2. 제작된 광변조기의 측정

제작된 세도파로 광변조기의 측정은 i) 광도파 모드측정

표 4. 광도파로와 진행파 전극의 공정 파라미터

광도파로	Ti 증착 두께 (T)	Ti Strip 폭(W)	확산온도	확산시간
		700 \AA	$5 \mu m$	$1050^\circ C$
진행파 전극	SiO_2 두께(t)	Base metal 두께		Au 전극두께(T)
	$1 \mu m$	Cr : 1000 \AA	Au : 1000 \AA	$10 \mu m$

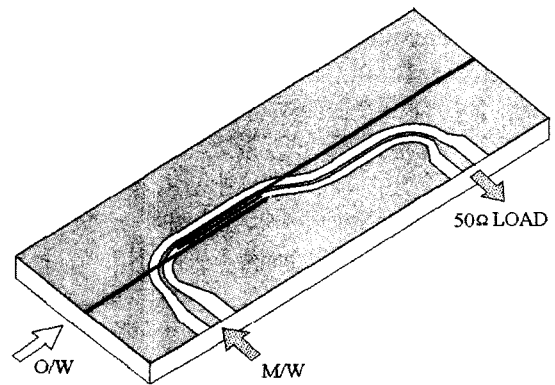


그림 10. 세 도파로 광변조기의 개략도.

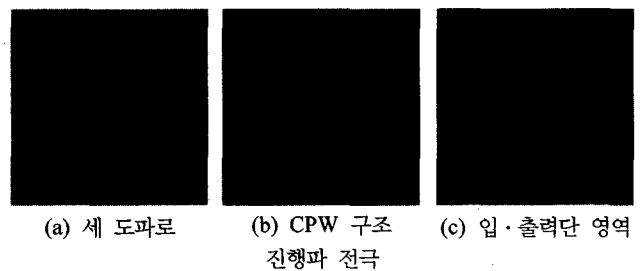


그림 11. 제작된 광도파로와 진행파 전극.



그림 12. Packaging 된 변조기 Chip.

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 요약될 수 있다.

A. 단일 모드 광도파로 및 DC 전압인가에 의한 광 스위칭 측정

Ti 내부 확산 등의 공정을 통해 제작된 단일 모드 세도파로 방향성 결합기의 광도파 실험을 하기 위한 장치 구성도가 그림 13에 나와 있다.

그림 13과 같이 구성된 광도파 측정 장치를 통하여 제작된

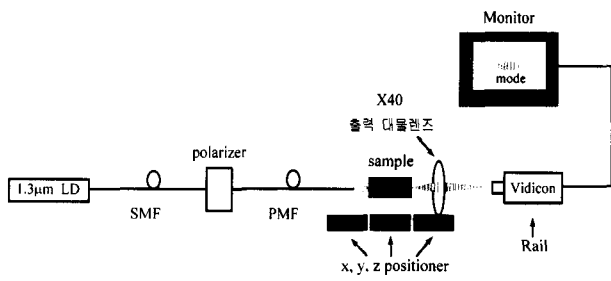
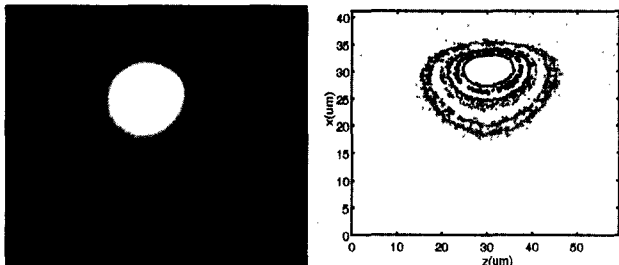


그림 13. 광도파로 측정 장치 구성도.



(a) Vidicon 카메라에 잡힌 도파모드 (b) 모드의 동고선 분포

그림 14. 단일 도파로의 near field 패턴.

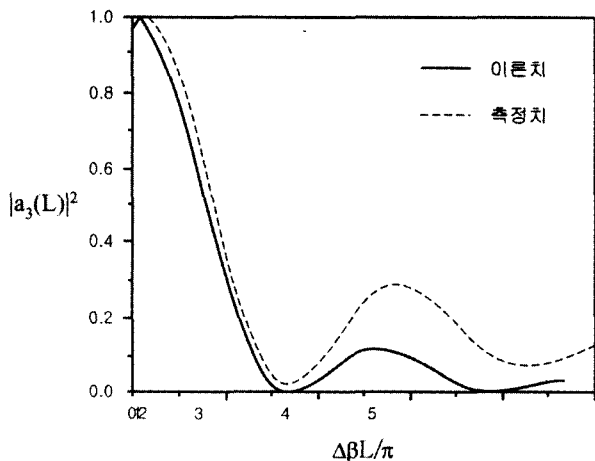


그림 15. 도파로 3의 출력 power 패턴.

광도파로가 단일 모드임을 확인하였다. 다음으로 세 도파로 방향성 결합기의 스위칭 전압을 측정하기 위하여 세도파로의 출력단을 Optical Power meter에 연결하였다.

그림 14에는 가운데 도파로에 파장 1.3 μm인 광을 입사시키고, 스위칭 전압을 인가하였을 때 IR Vidicon camera 에 잡힌 가운데 도파로 출력단의 Near field pattern을 나타내었다.

광도파 실험 결과 삽입손실은 약 4 dB, 스위칭 전압은 약 $V_0 = 15.6V$ 로 측정되었다. 그림 15에는 도파로 3에서 측정된 출력 전력 패턴을 이론치와 비교하여 나타내고 있다

그림을 볼 때 이론치와 측정치와 어느 정도 일치하는 것을 볼 수 있으며, 스위칭 전압 및 소멸비가 각각 15.6 V 및 35.1 dB 임을 측정하였다

스위칭 측정도중 SiO₂ buffer로 인해 나타나는 DC drift 현상이 인지되었다. 이는 일정 DC bias 하에서 광 출력이 시간에 따라 변화함으로부터 알 수 있다. 그러나 본 논문에서는 제작된 소자의 RF 특성에 초점을 맞추고자 하였으므로 이에 관한 언급은 생략하고자 한다.

B. CPW 진행파 전극의 S 파라미터 측정 및 전극 파라미터 추출^[15,16]

제작된 세도파로 광변조기의 S 파라미터 측정을 위하여 HP8510c Vector Network Analyzer를 사용하였고, K-Connector를 이용하여 광변조기의 M/W Port 와 Network Analyzer를 연결하였다.

그림 16은 특성임피던스 Z_c , Z_L 인 커넥터에 특성임피던스 Z_c 인 전송선로가 연결되어 있을 때의 S 파라미터를 묘사한 것이다. 입력단에서의 Γ_{11} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} = S_{11}' = S_{11} - \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{S_{22}\Gamma_L - 1} \quad (17)$$

여기서, $\Gamma_L = (Z_L - Z_m)/(Z_L + Z_m)$ (18)

1) 진행파 전극의 Z_c 추출

그림 17로부터 전극의 특성임피던스 Z_c 는 39.2 Ω으로 구해진다. 추출된 값은 설계한 값 50 Ω에서 많이 벗어나 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 등각사상법에 의한 입출력단 설계치의 결과와 FEM에 의한 활성영역 설계치의 결과를 선형적으로 interpolation하여 bending 영역을 설계하였는데, 이것이 이론치와 측정치가 다른 일차적 이유가 될 것이다. 또

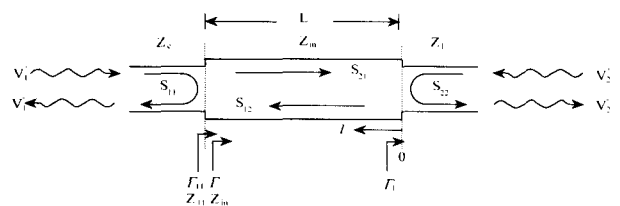


그림 16. 진행파 전극의 S파라미터.

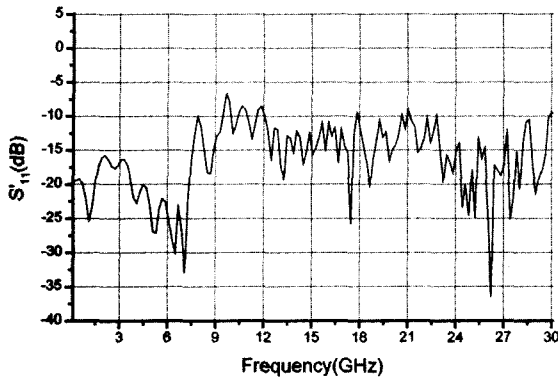


그림 17. M/W 반사특성 S_{11}' .

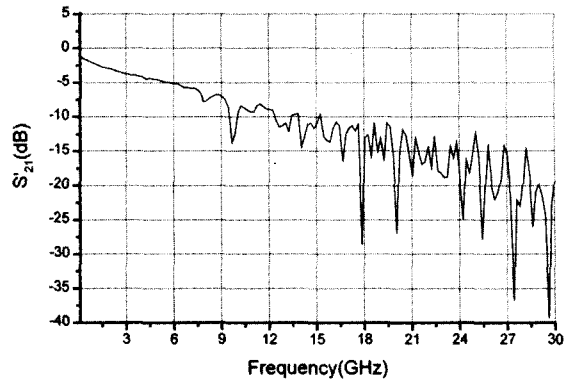


그림 18. M/W 투과특성 S_{21}' .

한 bonding 기술의 한계로 말미암아 패키징 과정 중 K-connector와 진행파 전극의 접합이 불안정하게 되었는데 이것이 이차적인 이유로 사료된다.

2) M/W 유효굴절률 N_{eff} 추출

M/W가 CPW 전극을 따라 진행할 때, 전극의 길이가 L이면 $\Psi_m(z) = e^{-j\beta_m L}$ 로부터 $2\beta_m L$ 만큼의 왕복 위상변위가 일어나고 이는 다음과 같다.

$$\beta_m L = N_{eff} k_0 L = \frac{2\pi f}{c_0} N_{eff} L \quad (19)$$

(c_0 : 진공중 M/W의 속도)

주파수에 따른 소멸간섭, 보강간섭을 고려하면 M/W의 유효굴절률 N_{eff} 는 다음식과 같다.

$$N_{eff} = \frac{c_0}{2L\Delta f} = \frac{15 \text{ cm} \cdot \text{GHz}}{L(\text{cm}) \cdot \Delta f(\text{GHz})} \quad (20)$$

여기서, $\Delta f = f_2 - f_1$ (21)

그림 17의 S_{11}' 곡선으로부터 M/W의 유효굴절률은 25 GHz까지 2.48정도의 평균적인 값이 계산되어지며, 설계치 2.15와 차이를 보인다. 이는 진행파 전극 제작시의 공정오차로 인한 전극의 크기변화와 전극의 입/출력영역과 K-Connector 와 의 연결 불량, 그리고 변조영역의 중앙 전극(W)과 M/W 입/출력 영역의 중앙전극(W)을 연결하는 Taper 영역에서의 M/W 반사가 주요한 원인이라고 추정된다. 참고로 이상적인 전극의 S_{11}' 곡선은 인가된 M/W 주파수가 증가하더라도 -20 dB이하에서 Peak와 Deep을 반복하게 된다.

3) 진행파 전극의 감쇠상수 α_0 추출

S_{21} 의 순수한 의미는 출력단 정합의 V_2/V_1^* 지만, 실제 Network Analyzer에서 측정되는 것은 S_{11} 에서와 마찬가지로 S_{21}' 이고 다음과 같이 표현된다.

$$S_{21}' = V_2/V_1^* = \exp(\alpha_m L) = \exp(\alpha_0 \sqrt{f} L) \quad (22)$$

그림 18의 M/W 투과특성 S_{21}' 곡선으로부터 전극의 감쇠상수 α_0 는 평균 $0.0665/\text{cm}\sqrt{\text{GHz}}$ 로 추출되었다.

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

표 5. 진행파 전극 파라미터

전극 Parameter	특성임피던스 Z_c	M/W 유효굴절률 N_{eff}	감쇠상수 α_0
추출된 값	39.2 Ω	2.48	$0.0665/\text{cm}\sqrt{\text{GHz}}$

표 5와 같이 추출된 진행파 전극 파라미터들을 이용하여 이론적인 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 Detector를 이용하여 측정 하였으며, 그 측정 방법의 개략도를 그림 19에 도시하였다.

그림 19에 도시한 바와 같이 Network Analyzer의 Port 1 으로부터 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 도파 광을 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 20에는 그림 19과 같은 방법으로 측정된 주파수 응답 S_{21} 을 나타내었다.

그림 20에서 실선은 앞선 S 파라미터 측정 시 추출한 진행파 전극 파라미터에 의해 이론적으로 계산된 주파수 응답 $R(\omega)$ 곡선이며, 작은 원은 PD에 의해 측정된 주파수 응답

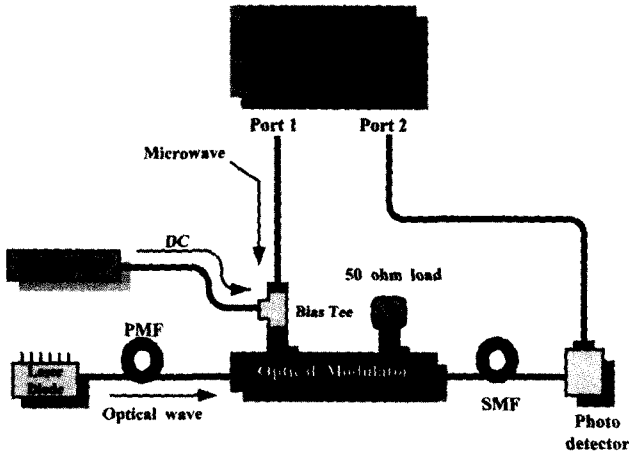


그림 19. 주파수 응답 $R(\omega)$ 측정 장치 구성도

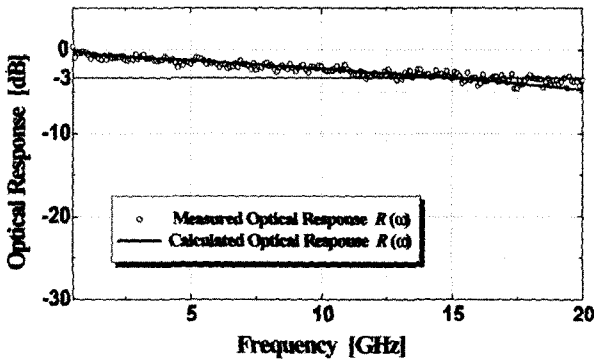


그림 20. 세 도파로 광변조기의 주파수 응답 $R(\omega)$.

$R(\omega)$ 곡선을 나타낸다.

측정된 광 주파수 응답 곡선은 이론적으로 계산한 주파수 응답곡선과 매우 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며, 그림 20을 통해 제작된 광변조기의 3 dB 변조역폭은 측정치와 이론치 모두 13 GHz 이상임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Ti:LiNbO₃ 세 도파로형 광도파로와 CPW 진행파 전극으로 구성된 고속 외부 광변조기를 설계, 제작하였다.

결합모드 이론을 이용하여 세 도파로 광결합기의 스위칭 현상을 해석하였으며, 유한차분법을 이용하여 단일 모드를 갖는 Ti:LiNbO₃ 광도파로를 설계하였고, 광 결합길이를 계산하였다. 또한, 등각사상법에 의하여 진행파 전극 입·출력단의 임피던스 정합을 위한 설계를 수행하였고, SOR에 의해 변조영역의 위상속도 및 특성 임피던스 정합 조건을 만족하도록 CPW 진행파 전극의 파라미터를 설계하였다. 세 도파로 광결합기의 제작을 위하여는 진공열증착, 표준사진석판법, Ti 내부화산 공법등이 사용되었고, SiO₂ 완충박막과 CPW

진행파 전극의 성장을 위하여는 각각 PECVD와 전기분해 공법이 사용되었다.

제작된 소자의 dc 스위칭 및 전극의 RF 특성을 측정하였다. 제작된 세 도파로 광변조기의 삽입손실과 스위칭 전압은 약 4 dB와 15.6 V였다. 스위칭 전압은 이론치와 유사한 스위칭 조건을 얻을 수 있었다.

Network Analyzer를 통하여 측정된 S 파라미터로부터 특성임피던스 $Z_c=39.2$, M/W 유효굴절률 $N_{eff}=2.48$, 그리고 감쇠상수 $\alpha_o = 0.0665 / \text{cm} \sqrt{\text{GHz}}$ 등의 진행파 전극 파라미터를 추출하였다. 특성임피던스와 M/W 유효굴절률, 그리고 감쇠상수 등이 설계된 것과 다르게 나타난 이유는 M/W Port와 진행파 전극간의 Bonding시 사용한 Silver Paste 불량, Network Analyzer와 진행파 전극 Mount의 Connector 부정합, 두겹게 성장한 Au 전극 표면의 거칠기, 그리고 전극 제작시 발생한 중앙 전극 폭(W)과 전극사이 간격(S)의 공정오차 등으로 추정된다.

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

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00288-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Steven K. Korotky and Rod C. Alferness, "Time- and frequency-domain response of directional-coupler traveling-wave optical modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-1, no. 1, pp. 244-251, March 1983.
- [2] R. C. Alferness, C. H. Joyner, L.L. Buhl, and S.K. Korotky, "High-speed traveling-wave directional coupler switch/modulator for $\lambda=1.32 \mu\text{m}$," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-19, no. 9, pp.1339-1342, Sept. 1983.
- [3] S. K. Korotky, G. Eisenstein, R. S. Tucker, J. J. Veselka, and G. Raybon, "Optical intensity modulation to 40 GHz using a waveguide electro-optic switch," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, no. 8, pp. 1631-1633, June 1987.
- [4] C. H. Bulmer, W. K. Burns, and C. W. Pickett, "Linear 0-20GHz modulation with a 1×2 directional coupler," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 28-30, Jan. 1991.
- [5] H. Haga, M. Izutsu, T. Sueta, "LiNbO₃ traveling-wave light modulator/switch with an etched groove," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 6, pp. 902-906, June 1986.
- [6] H. Miyamoto, H. Ohta, K. Tabuse, H. Iwaoka, and Y. Miyagama, "A broad-band traveling-wave Ti:LiNbO₃ optical phase modulator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 30, pp. L383-

- L385, 1991.
- [7] G. K. Gopalakrishnan, C. H. Bulmer, W. K. Burns, R. W. McElhanon, and A. S. Greenblatt, "40GHz, low half-wave voltage Ti:LiNbO₃ Intensity modulator," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 9, pp. 826-827, April 1992.
- [8] K. Kawano, "High-speed shielded velocity-matched Ti:LiNbO₃ optical modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 2466-2475, Sept. 1993.
- [9] G. K. Gopalakrishnan, W. K. Burns, R. W. McElhanon, C. H. Bulmer, and A. S. Greenblatt, "Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 10, pp. 1807-1815, Oct. 1994.
- [10] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "Broadband Ti:LiNbO₃ optical modulator with a ridge structure," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 6, pp.1164-1168, Sept. 1995.
- [11] S. Hopfer, Y. Shani, D. Nir, "A novel, wideband, lithium niobate electrooptic modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 73-77, Jan. 1998.
- [12] K. W. Hui, K. S. Chiang, B. Wu, and Z. H. Zhang, "Electrode optimization for high-speed traveling-wave integrated optic modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 232-238, Feb. 1998.
- [13] Kazuto Noguchi, Osamu Mitomi, and Hiroshi Miyazawa, "Milimeter-wave Ti:LiNbO₃ optical modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 615-619, April 1998.
- [14] 정석원, 김창민, "진행파 광변조기의 Taper영역 전극 설계 : SOR기법," *한국광학회 논문지*, 제7권 1호, pp. 78-86, 1996년 3월.
- [15] 한영탁, 이우진, 고병국, 이병권, 김창민, "Mach-Zender 간섭기를 이용한 진행파 Ti:LiNbO₃ 광변조기," *대한전자공학회지 논문지*, 2001년 11월.
- [16] 이우진, 김경암, 김우경, 김창민, "m-section의 전극반전 이 있는 Mach-Zehnder형 진행파 Ti:LiNbO₃ 광변조기," *대한전자공학회 논문지*, 제39권 SD편 제7호, pp. 26-36 2002년 7월.
- [17] 김영문, 서정훈, 이세호, 허창열, 김창민, "바깥도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광 스위치의 설계 및 제작," *대한전자공학회 논문지*, 제36권 D편 제6호, pp. 539- 548, 1999년 6월.
- [18] 허창열, 한영탁, 김창민, "가운데도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광 스위치의 설계 및 제작," *대한전자공학회 논문지*, 제37권 D편 제6호, pp. 64-71, 2000년 6월.

**Ti:LiNbO₃ three-waveguide type traveling-wave optical modulator;
outer fed, anti-symmetrical Detuning**

Woo-jin Lee[†]

ETRI Optical Interconnection Basic Research Laboratory, 161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

[†]E-mail: lwj@etri.re.kr

Eun-Joo Jung, Joong-Ho Pi, and Chang-Min Kim

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

(Received April 20, 2004, Revised manuscript July 12, 2004)

Switching phenomenon of a three-waveguide optical coupler was analyzed by using the coupled mode theory, and the coupling-length of the device was calculated by means of the FDM. CPW traveling-wave electrodes were designed by the CMM and SOR simulation techniques so as to satisfy the conditions of phase-velocity and impedance matching. Traveling-wave modulators were fabricated on a z-cut LiNbO₃ substrate. Ti was in-diffused in LiNbO₃ to make waveguides and Au electrodes were built on the waveguides by the electroplating technique. Insertion loss and switching voltage of the optical modulator were about 4 dB and 15.6V. Network analyzer was used to obtain S parameters and corresponding RF response. From the measurement, parameters of the traveling-wave electrodes were extracted as such $Z_c=39.2 \Omega$, $N_{eff}=2.48$, and $a_0=0.0665/cm((GHz)^{(1/2))}$. The measured optical response $R(w)$ was compared with the theoretically estimated and both responses were shown to agree well.

The measurement results revealed that the 3dB bandwidth turned out to be about 13 GHz.

OCIS Codes : 250.7360.