

## CPW 진행파 전극, M-Z형 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광 변조기

피중호<sup>†</sup> · 정은주 · 최정성 · 김창민

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부  
Ⓣ 130-743 서울시 동대문구 전농동 90번지

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

Mach-Zehnder 간섭기와 CPW 진행파 전극을 이용한 외부 광변조기를 제작하였다. 유한차분법(FDM)을 이용하여 단일모드를 갖는 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파를 설계하고 이를 기반으로 M-Z 간섭기를 설계하였다. 또한 도파광과 MW간의 위상속도를 정합시키고 MW의 특성임피던스를 50Ω으로 맞추기 위하여, CPW 전극의 입·출력단 및 변조영역을 반복이완법(SOR)으로 수치해석 하였다. 제작된 소자의 삽입손실은 -3.2dB 정도였고, CPW 전극의 S<sub>11</sub>은 12 GHz 이하의 주파수에서 -15 dB이하를 유지하였으며, S<sub>21</sub>은 7 GHz까지 -3dB 이상을 나타내었다. 주파수 응답 측정 결과, 12 GHz에서 3 dB 변조대역폭을 갖는 것으로 측정되었다.

주제어 : Mach Zehnder interferometer, travelling-wave electrodes, Ti:LiNbO<sub>3</sub>, optical modulator.

### I. 서 론

정보기술의 혁신과 인터넷 활용 인구의 폭발적인 증가로 지식정보사회의 이행이 더욱 가속화되고 있다. 이러한 변화는 고속, 대용량의 정보 전송 시스템을 필요로 하게 되었고, 이에 따라 광통신 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광변조기는 광통신 시스템을 구성하는 능동 소자 중 하나이며, 신호처리와 광대역 광통신을 위한 필수소자라 할 수 있다.

효율적인 광 집적소자를 얻으려면 전기광학효과가 큰 재료를 이용하는 것이 바람직하며, 대체로 Ferroelectric 계열의 재료가 큰 전기광학계수를 갖는다. 이 중 LiNbO<sub>3</sub>는 상대적으로 작은 전기광학계수를 가지지만, Curie 온도가 높고 좋은 품질의 큰 단결정을 쉽게 얻을 수 있으며, Ti 확산법을 이용하여 저손실, 단일모드 광도파를 쉽게 제작할 수 있는 이점이 있어 가장 많이 이용된다.

10 GHz 이상의 고속 광변조는 외부변조가 필수적으로 요구되고<sup>[1-2]</sup> 외부광변조기는 광결합기와 진행파 전극으로 구성된다. 광결합기의 구조는 방향성 결합기, Y-분기형 결합기, 세도파로형 결합기, M-Z형 결합기 등이 있으며, M-Z형 결합기는 결합길이에 상관없이 좋은 소멸비를 얻을 수 있는 장점이 있다. 전극구조는 CPW와 ACPS가 있는데 50Ω 매칭이 쉬운 CPW가 주로 쓰인다.

광변조기의 성능은 주로 3 dB 변조대역폭과 구동전압에 의해 결정되며, 이러한 특성은 변조영역의 길이와 trade-off 관계를 갖고 있다.<sup>[3-4]</sup> 광변조기의 변조대역폭을 제한하는 주요 요인으로는 도파광과 MW간의 위상속도 부정합, MW의 특성임피던스 부정합, MW의 전파손실 등을 들 수 있다.<sup>[2-6]</sup>

위상속도 및 특성임피던스의 부정합은 모두 LiNbO<sub>3</sub> 기판의 높은 유전율에 기인한다.<sup>[5-6]</sup> MW의 전파손실의 원인으로는 도체손실, 유전손실 등을 들 수 있으나 주로 제작공정상에서 발생하는 전극의 거친 표면과 패턴의 불균일성에 의해 발생된다. 변조영역에서 도파광과 MW 간의 위상속도 정합 및 MW 특성임피던스의 50Ω 정합을 동시에 만족시키기 위해서는 두꺼운 버퍼층의 도입이 불가피하며, 이는 구동전압을 높이는 결과를 초래한다. 이러한 난제를 타개하기 위해 다양한 전극구조의 도입이 시도되어 왔는데, 버퍼층 또는 기판을 식각하거나<sup>[7-8]</sup> 전극의 둘레를 shielding하는 방법<sup>[9]</sup> 등이 대표적이다.

본 논문에서는 단일모드를 갖는 z-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로를 설계하고 공정조건을 도출하였으며, 이를 바탕으로 M-Z 결합기를 제작하였다. 또한 M-Z 결합기 위에 CPW 구조의 진행파 전극을 탑재함으로써 광변조기를 제작하고, 제작된 소자의 특성을 측정하였다.

광변조기의 제작 공정은 다음과 같다. z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판 상에 열증착법(thermal evaporation), 표준사진석판법(standard photography), Ti 내부확산법(in-diffusion) 등을 사용하여 M-Z 결합기를 제작하였다. PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법을 사용하여 SiO<sub>2</sub> 박막을 증착하였고, base metal인 Ti, Au를 진공열 증착법을 사용하여 차례로 증착하였으며, 전기도금(electroplating) 방법을 사용하여 진행파 전극을 위한 Au를 성장하였다. 이후 습식식각(wet etching)과 건식식각(dry etching)을 이용하여 base metal을 제거하였다.

제작된 소자의 성능을 테스트하기 위한 측정이 다음과 같이 수행되었다. 1.3 μm LD와 optical power meter를 이용하여 제작된 소자의 삽입손실을 측정하였다. HP 8510C Vector Network Analyzer를 이용하여 제작된 CPW 전극의 S 파라미터를 측정하였다. High speed PD(photo detector), 50Ω Ter-

<sup>†</sup>E-mail: pjh2918@hammail.net

mination, 그리고 HP 8510C Vector Network Analyzer를 이용하여 제작된 소자의 주파수 응답을 측정하였다.

## II. M-Z 결합기의 설계 및 제작

### 2.1. 모의전산을 통한 단일모드 광도파로 설계

M-Z 광 스위치는 분기된 두 도파로를 진행하는 도파광 사이의 위상속도 차를 이용하므로, 도파로에 다모드가 존재할 경우 모드간의 간섭으로 말미암아 스위치로서의 동작을 할 수 없게 된다. 따라서 스위치를 구성하는 광도파로는 단일모드를 취하여야 하며, 이를 위해서는 공정조건을 고려한 광도파로의 설계가 선행되어야 한다. 그림 1은 유한차분법(FDM)을 이용하여 수직편극을 갖는 도파광에 대한 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로의 유효 굴절률을 Ti의 초기 두께에 따라 도시한 것이며, 파장  $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ , 확산온도  $T=1050^\circ\text{C}$ , 확산시간  $t=8$ 시간에서 수행된 모의전산 결과이다.

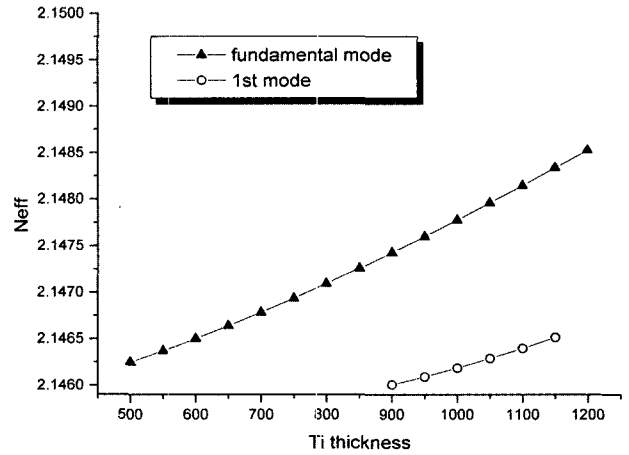
모의전산 결과  $w$ 가  $5 \mu\text{m}$ 에서는 초기 Ti 두께가  $900 \text{ \AA}$ 에서 fundamental 모드의 cut-off가 나타나며,  $7 \mu\text{m}$ 의 경우에는  $700 \text{ \AA}$ 에서 발생함을 예측할 수 있다.

### 2.2. 최적화된 단일모드 광도파로 공정조건 도출

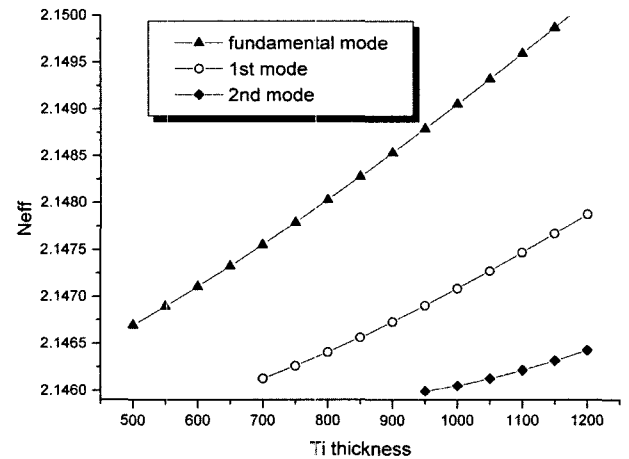
#### A. 확산분위기가 외부확산에 미치는 영향

확산과정은 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 Ti의 내부확산을 목적으로 하나, 부수적으로 LiNbO<sub>3</sub> 기판에서 Li<sub>2</sub>O의 외부확산을 유발한다. Li<sub>2</sub>O의 외부확산은 LiNbO<sub>3</sub> 기판의 굴절률 변화를 유발하여 기판의 표면에 평판 도파로를 형성하게 되며, 입사광은 Ti가 확산된 광도파로 뿐만 아니라 기생 평판 도파로에 넓게 퍼진 형태로 도파된다. 이는 결국 fiber-to-waveguide 결합손실 및 도파광의 전파손실을 높이는 결과를 초래하게 된다. 이러한 외부확산을 방지하고자 본 논문에서는 수증기 분위기의 확산과정을 도입하였다.

그림 2는 Ti 내부확산을 위한 수증기 분위기 확산 시스템의 개략도를 도시한 것이다. heater를 통해 가열된 수조에서 발생하는 수증기는 확산로에 유입되는데, 이때 O<sub>2</sub> 가스는 수증기를 운반하는 carrier로서의 역할을 한다. 확산 분위기가 외부확산에 미치는 영향을 확인하기 위해 수증기의 온도를 변화시키면서 확산된 광도파로의 도파모드를 관찰하였다. 표



(a)  $w = 5 \mu\text{m}$ 일 때



(b)  $w = 7 \mu\text{m}$ 일 때

그림 1.  $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 에서 Ti 초기 두께에 따른 도파광의 유효굴절률 ( $T=1050^\circ\text{C}$ ,  $t=8$ hours).

1은 실험을 통해 관찰된 확산분위기에 따른 외부확산현상의 변화를 정리한 것이다.

Dry O<sub>2</sub> 확산 분위기에서는 외부확산이 강하게 나타났으며, 증류수 온도  $95^\circ\text{C}$  wet O<sub>2</sub> 확산 분위기에서 외부확산에 의한 기생 평판도파로 형성이 억제됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 확산 중에 존재하는 H<sub>2</sub>O성분이 Li 이온의 이동도를 저하

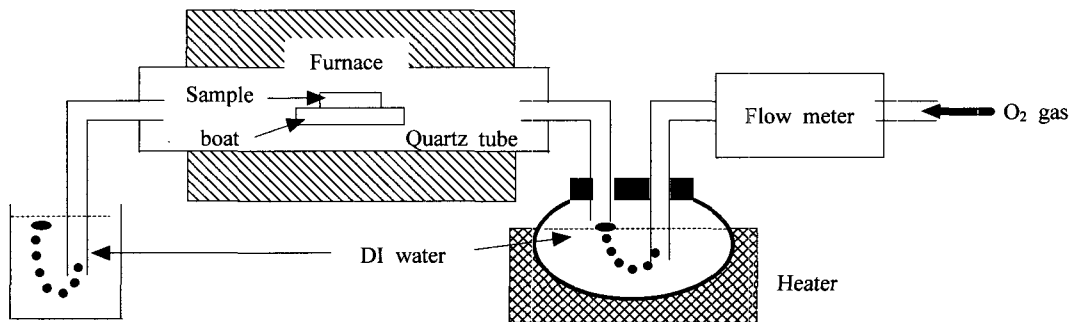


그림 2. Ti 내부확산을 위한 확산 시스템.

표 1. 확산분위기가 외부확산에 미치는 영향 (T:1050℃, t=8hours)

확산 분위기	외부확산에 의한 광 퍼짐 현상
Dry O <sub>2</sub>	기판의 표면에 광이 강하게 도파됨
Wet O <sub>2</sub> (증류수 온도 60℃)	기판의 표면에 광이 약하게 도파됨
Wet O <sub>2</sub> (증류수 온도 95℃)	기판의 표면에 광도파 현상이 나타나지 않음

시키어 외부확산을 억제시키는 것으로 알려져 있다.<sup>[10]</sup>

**B. 확산 분위기가 광도파 특성에 미치는 영향**

일반적으로 Ti 내부확산 후 기판표면이 부풀어 오르는 것을 볼 수 있는데, 이는 확산 시 발생하는 부수적인 조성물로 입사광의 전파손실을 일으키는 원인이 된다. 이러한 현상은 확산과정 이전이나 확산 중에 외부유입에 의한 불순물과 Ti 이온이 고온에서 새로운 조성을 하였거나, 불순물이 Ti가 확산되어 들어갈 자리를 차지하여 확산되지 못한 Ti와 웨이퍼 성분의 일부가 반응을 일으킨 것으로 추정된다. 이러한 조성물의 존재는 도파광의 형성에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 전파손실을 일으키는 주요 원인이 되므로 이를 억제하기 위한 확산 분위기의 도입이 필요하다<sup>[11]</sup> 따라서 본 논문에서는 확산과정 시 유입되는 산소의 양을 조절함으로써 이를 억제하기 위한 실험을 수행하였다.

표 2. 확산중 산소 유입량에 따른 기판표면 조성물의 두께 및 광도파로 삽입손실

산소 유입량	기판표면 조성물의 두께	삽입손실
1 L/min	10000 Å	-27.5 dB
0.5 L/min	8000 Å	-23.8 dB
없음	500 Å	-2.2 dB

표 2는 확산과정 중 확산로에 유입되는 산소량에 따른 기판표면의 조성물의 두께와 도파광의 삽입손실을 나타낸 것이다. 산소유입량이 증가할수록 기판표면의 조성물의 두께가 높아짐을 알 수 있고, 이에 따라 도파광의 삽입손실이 커지는 것을 볼 수 있다.

**C. 최적화된 단일모드 광도파로 제작**

위와 같은 확산실험에 의해 최적의 확산분위기를 얻을 수 있었으며, 이로부터 각각 5 μm, 7 μm의 Ti 폭에 대해 Ti 두께에 따른 광도파로 제작이 이루어졌다.

표 3은 w가 각각 5 μm, 7 μm일 때 Ti 초기 두께에 따라 나타난 모드 수 및 삽입손실을 측정된 것이다. w = 5 μm에서 Ti 초기 두께가 950 Å일 때 단일모드가 나타났으며, w = 7 μm에서는 Ti 초기 두께가 800 Å일 때 단일모드 광도파로 형성되었고, 삽입손실 또한 가장 작았다. 따라서 본 연구로부터 최소의 삽입손실을 갖는 단일모드 광도파로의 제작공정 파

라미터는 표 4와 같이 요약될 수 있다.

표 3. w=5μm, 7μm에서 Ti 초기 두께에 따른 광 도파특성

w(Ti 초기 폭)	t(Ti 초기두께)	모드 수	삽입손실
5 μm	1100 Å	2	-3.8 dB
5 μm	1000 Å	2	-2.8 dB
5 μm	950 Å	1	-2.6 dB
5 μm	850 Å	1	-3.6 dB
7 μm	950 Å	2	-3.3 dB
7 μm	850 Å	2	-2.5 dB
7 μm	800 Å	1	-2.2 dB
7 μm	750 Å	1	-3.1 dB

표 4. 단일모드 광도파로 제작공정 파라미터

Ti strip 폭	Ti strip 두께	확산 온도	확산 시간	증류수 온도	산소 유입량
7 μm	800 Å	1050℃	8 hours	95℃	없음

**2.3. Mach-Zehnder 결합기의 설계<sup>[12]</sup>**

Mach-Zehnder 결합기를 지나는 도파광은 전극에 전압이 인가되지 않을 경우 두도파로로 분기 후 위상차 없이 다시 합해져서 출력되게 되고, 전압이 인가되면 push-pull 작용으로 인해 서로 다른 굴절율을 느끼며 진행한다. 일정거리를 지나면 위상차가 180°가 되어 두 도파로가 만나는 지점에서 소멸된다. 대칭구조를 갖는 Mach-Zehnder 결합기에서 전극 길이와 입력전압사이의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$L = \frac{\lambda \cdot S}{n_e^3 r_{33} (\Gamma_1 + \Gamma_2) V_{sw}} \tag{1}$$

λ=1.3μm 수직 편극 광 입사에 대하여 전극간의 간격 S=18 μm, n<sub>e</sub><sup>3</sup>r<sub>33</sub> = 306 × 10<sup>-6</sup> μm/V, Γ<sub>1</sub>=Γ<sub>2</sub>=0.273, 구동전압 V<sub>sw</sub>=5V로 예상하면 변조영역의 길이 L=28000 μm 정도로 계산되어진다. 여기서, 전극간의 간격(S)는 MW의 특성임피던스 50Ω과 도파광과 MW간의 위상속도 정합을 고려한 수치이다.

제작되어진 M-Z 광결합기의 확산 전 Ti의 치수는 그림 4와 같다.

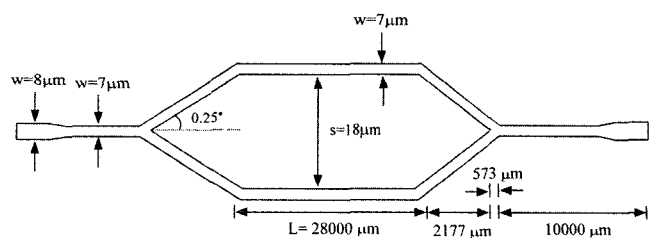


그림 3. 설계된 M-Z 광도파로 치수 (μm).

**2.4. Mach-Zehnder 결합기 제작**

설계된 Mach-Zehnder 결합기의 치수 및 패턴을 바탕으로 Mask를 제작하였고, 열증착법(thermal evaporation), 표준식판법(standard photolithography)과 건식식각(dry etching)법 등의 반도체 공정을 이용하여 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 Ti 패턴을 형성하였다. 최적화된 도파로 공정조건 하에 Ti를 내부화산하여 Mach-Zehnder형 결합기를 제작하였다. 그림 4는 제작된 Mach-Zehnder 결합기를 보여준다.

**III. CPW 진행파 전극의 제작**

MW가 신호의 왜곡이나 반사손실 없이 전극의 변조영역에 도달하고 출력되기 위해서는 CPW 전극 전 영역에 걸쳐 특성임피던스의 정합이 필요하다. 또한 변조영역에서는 도파광과 MW의 위상속도 정합이 이루어져야하므로 이를 고려한 설계 역시 중요하다. 본 논문에서는 SOR을 이용하여 MW 입·출력단 및 변조영역을 설계하였고, 이를 바탕으로 전극을 제작하였다.

**3.1. MW 입·출력단 전극 설계**

MW의 원활한 입·출력을 위해서는 반드시 50Ω의 특성임피던스를 갖는 MW 입·출력단의 설계가 선행되어야 한다.

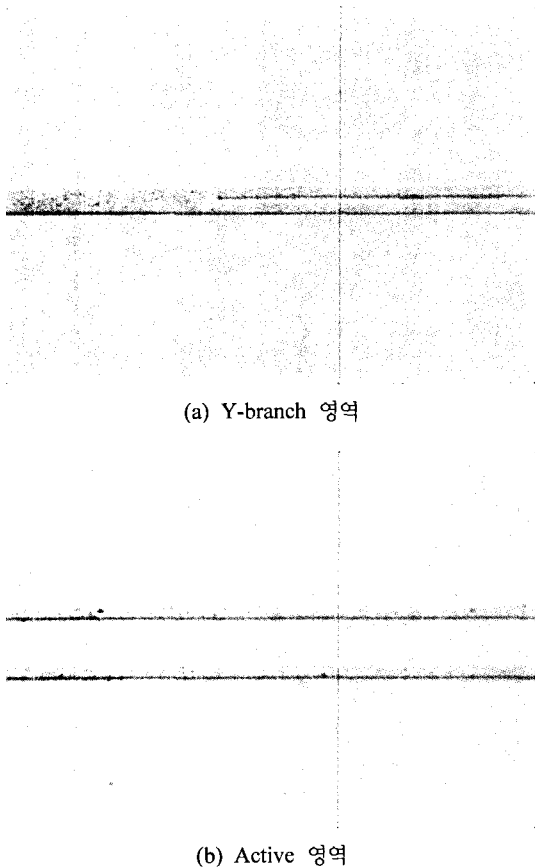


그림 4. 제작된 M-Z 결합기.

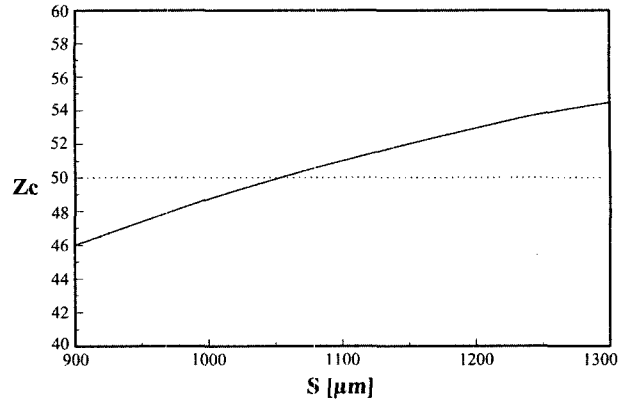


그림 5. 전극간의 간격(S)에 따른 입·출력단에서의 특성임피던스 ( $Z_c$ ) 변화 ( $W=300\mu\text{m}$ ,  $D=500\mu\text{m}$ ).

본 논문에서 사용되는 MW connector K103F의 bead 폭을 고려하여 CPW 중앙전극의 폭  $W$ 는  $300\mu\text{m}$ 로 하였고, SOR을 사용하여 50Ω의 특성임피던스를 갖는 전극구조를 설계하였다.<sup>[13-14]</sup> MW 입·출력단에서는 버퍼층 및 전극의 두께가 중앙전극의 폭에 비해 매우 작으므로 CPW 전극의 전계 분포에 큰 영향을 주지 못한다. 이러한 이유로 모의전산 시 버퍼층 및 전극의 두께는 해석대상에서 제외하였으며, 이로부터 해석시간을 현저히 줄일 수 있었다.

그림 5는 모의전산을 통해 얻은 전극의 간격 변화에 따른 특성임피던스의 변화를 나타낸 것이다. LiNbO<sub>3</sub> 기판의 두께  $D$ 가  $500\mu\text{m}$ 일 때 전극간의 간격이 대략  $1000\sim 1100\mu\text{m}$  사이에서 50Ω의 특성임피던스를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

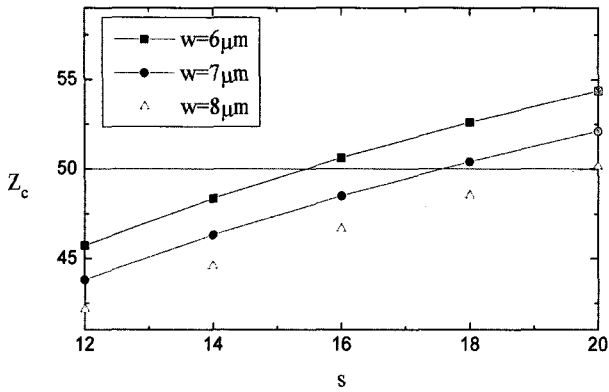
**3.2. 변조영역 설계<sup>[15]</sup>**

MW의 source 및 load의 특성임피던스  $Z_c=50\Omega$ 이고  $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 에서 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로를 진행하는 도파광의 유효굴절률  $n_{eff}=2.15$ 인 점을 감안할 때, 광대역의 변조대역폭을 얻기 위해서는 CPW 진행파 전극의 MW 특성임피던스 및 유효굴절률이  $Z_c=50\Omega$ ,  $N_{eff}=2.15$ 로 정합되어야만 한다. 이러한 조건을 만족하는 전극구조를 얻기 위해 중앙전극의 폭  $W$ , 전극간의 간격  $S$ , 전극 두께  $T$ , SiO<sub>2</sub> 박막의 두께  $t$ 등을 변화시키면서 모의 전산을 수행하였다.

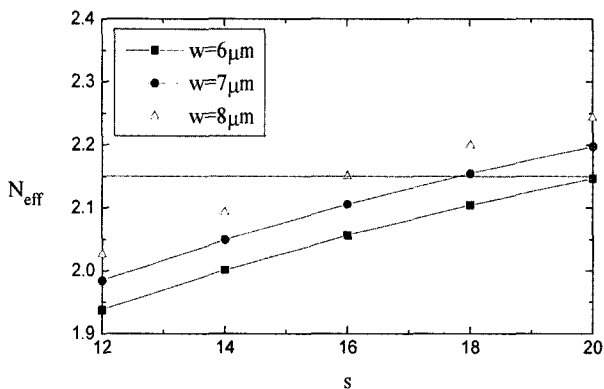
그림 6은 모의 전산을 통해 구해진 CPW 전극 구조의 특성 임피던스 및 유효 굴절률을 도시한 것이다. 그림 6으로부터 전극 두께  $T=12\mu\text{m}$ ,  $W=7\mu\text{m}$ 일 때  $S=18\mu\text{m}$ 에서  $Z_c=50\Omega$ ,  $N_{eff}=2.15$ 를 만족시키고 있음을 알 수 있다. 이상의 해석과정으로부터 본 연구에서 제작한 CPW 진행파 전극의 각 파라미터는 다음 표 5와 같으며, 그림 7은 설계된 전극 구조의 단면을 도시한 것이다.

**3.3. CPW 전극의 제작**

전극의 제작에 앞서 PECVD 공정을 통해  $1.6\mu\text{m}$  두께의 SiO<sub>2</sub>를 증착하였다. 입·출력단과 변조영역의 설계치를 바탕으로 전극 mask를 제작하였으며, 입·출력단과 변조영역의



(a) 특성 임피던스 ( $Z_c$ )

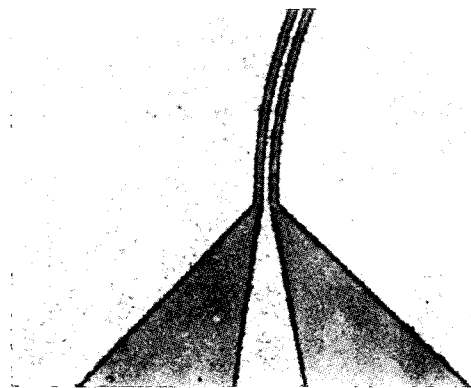


(b) M/W 유효 굴절률( $N_{eff}$ )

그림 6. 전극 사이의 간격에 따른  $Z_c$ ,  $N_{eff}$ ( $T=12\mu\text{m}$ ,  $t=1.6\mu\text{m}$ )



(a) Active 영역



(b) Taper & bending 영역

그림 8. 도파로 위에 제작된 CPW구조의 진행파 전극.

표 5. CPW 진행파 전극의 각 파라미터

SiO <sub>2</sub> 박막 두께 t	Au 전극 두께 T	중앙 전극 폭 W	전극 사이의 간격 S
1.6 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$	7 $\mu\text{m}$	18 $\mu\text{m}$

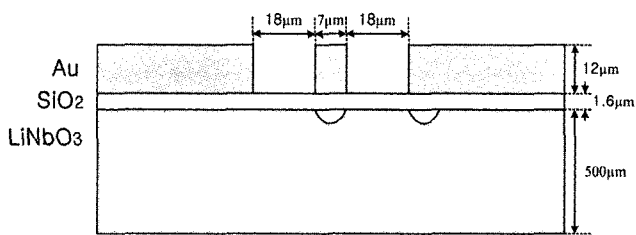


그림 7. 설계된 전극구조의 단면도

연결은 선형 Taper와 bending을 사용하였다. 열증착법을 사용하여 base metal인 Ti와 Au를 증착하였고, 표준석판법을 사용하여 M-Z 결합기 위에 전극 패턴을 형성하였다. 전극 패턴 형성 후 전기도금법을 사용하여 12  $\mu\text{m}$  두께의 Au전극을 제작하였고, 습식, 건식 식각법을 사용하여 base metal로 쓰인 Au, Ti를 식각하였다. 최종적으로 제작된 CPW 전극은 그림 8과 같다.

#### IV. 패키징 및 광 변조특성 측정

##### 4.1. 피그테일링 및 패키징

전극 제작이 완료된 소자는 광 변조특성의 측정에 앞서 단면연마, 피그테일링 및 패키징 과정을 거치게 된다. 단면연마는 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$  다이아몬드 lapping film을 사용하여 수행하였다. 피그테일링 작업은 x, y, z positioner에서 행해졌으며, 광도파로의 입·출력단에 굴절률 매칭 에폭시를 사용하여 광섬유를 연결하였다. 이 때, 입력단의 광섬유는 1.3  $\mu\text{m}$  LD에 연결하고, 출력단의 광섬유는 optical power meter에 연결하여 출력광의 광파워가 최대가 되도록 하였다. 피그테일링이 끝난 후의 삽입손실은 3.2 dB였다.

스위칭 측정도중 SiO<sub>2</sub> 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.

피그테일링한 소자를 silver paste를 사용하여 mount에 내장하였고, mount에 고정시킨 k-connector와 전극을 연결하여 패키징을 완료하였다. 그림 9는 제작된 광 변조기의 사진이다.

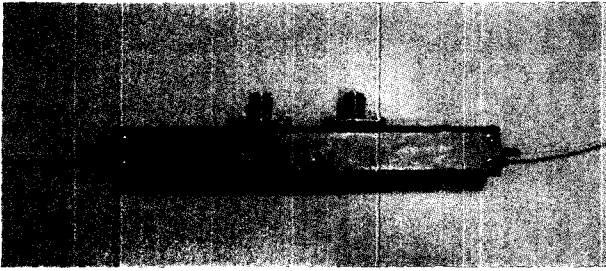


그림 9. 제작된 광변조기의 모습.

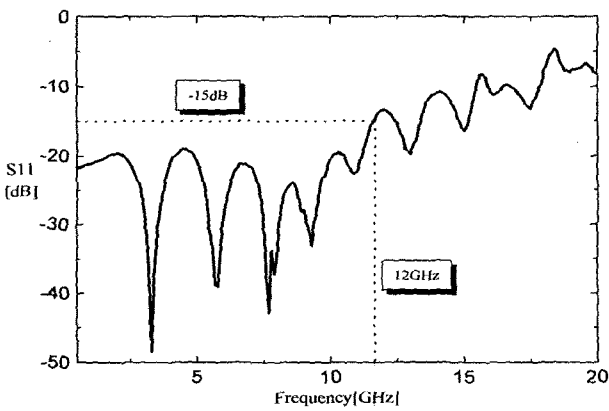
4.2. Microwave의 S 파라미터 및 광 변조도 측정

A. S 파라미터 측정

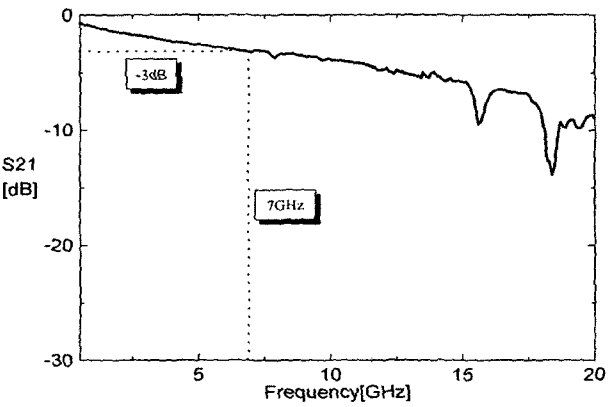
HP8510c Vector Network Analyzer를 사용하여 제작된 소자의 S 파라미터를 측정하였다. 측정 시 소자와의 연결은 K103F connector를 사용하였다. 측정된 S<sub>11</sub>과 S<sub>21</sub>은 다음 그림 10과 같다.

그림 10 (a)의 반사특성을 보면, 약 12 GHz까지 -15 dB 변조 대역폭을 갖는 것을 알 수 있다. 이 대역에서 특성임피던스 Z<sub>m</sub>은 46Ω, 유효 굴절률 N<sub>eff</sub>는 2.30으로 계산되어진다.<sup>[12]</sup> 설계치인 50Ω, 2.15와는 다소 차이를 보인다.

본 연구에서는 등각사상법에 의한 입출력단 설계치의 결과



(a) S<sub>11</sub>



(b) S<sub>21</sub>

그림 10. MW 특성.

와 FEM에 의한 활성영역 설계치의 결과를 선형적으로 interpolation하여 bending 영역을 설계하였는데, 이것이 이론치와 측정치가 다른 일차적 이유가 될 것이다. 또한 bonding 기술의 한계로 말미암아 패키징 과정 중 K-connector와 진행파 전극의 접합이 불안정하게 되었는데 이것이 이차적인 이유로 사료된다.

그림 10(b)의 전송특성의 3 dB 변조 대역폭은 7 GHz로 나타났고, 이 대역에서의 감쇠정수 α<sub>0</sub>를 구해보면 평균적으로 0.055/cm√GHz 정도이다.<sup>[12]</sup>

4.3. 광 변조특성 측정

그림 11과 같은 주파수 응답 측정시스템을 통하여 제작된 소자의 광 변조특성을 측정하였다. 광도파로의 입력단에 연결된 광섬유에 LD를 사용하여 1.3 μm 파장의 TM모드 광을 입사하였고, 출력단에 연결된 광섬유를 PD를 거쳐 Network analyser에 연결하였다. 전극의 입력단에는 Network analyser의 port 1을 연결하여 RF 신호를 인가하였고, 출력단에는 50 Ω 저항을 연결하여 변조 후 출력되는 RF신호를 흡수하도록 하였다.

그림 12는 제작된 광변조기의 주파수 응답 특성이다.

그림 12의 실선은 전극 특성으로부터 추정된 주파수 응답 곡선이고, 측정된 데이터는 점으로 표시되었다. 대체적으로 측정된 결과와 이론치가 매우 유사하고, 3 dB 변조대역폭은 12 GHz 이상으로 나타났다.

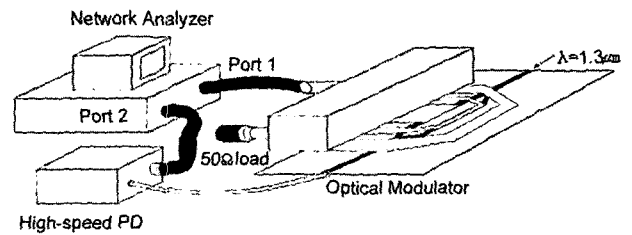


그림 11. 주파수 응답 측정 시스템.

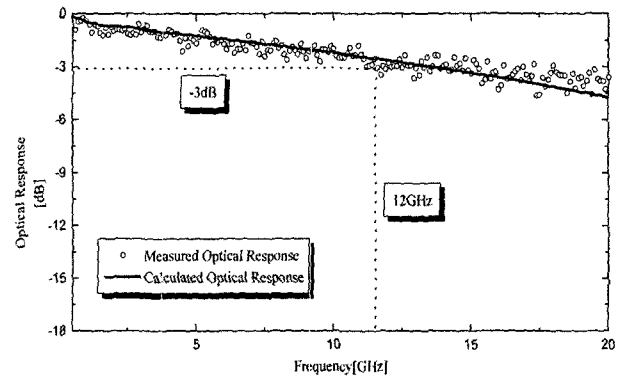


그림 12. 제작된 광변조기의 주파수 응답.

## V. 결 론

고속 외부 광변조기는 광대역 초고속 광통신에서 요구되는 핵심소자이다. 본 논문에서는 Mach-Zehnder 간섭기와 CPW 진행파 전극을 이용한 외부 광변조기를 설계, 제작 및 측정하였다.

유한차분법(FDM)을 이용하여 단일모드를 갖는 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광도파로를 설계하고 공정조건을 도출하였으며, 이를 기반으로 M-Z 간섭기를 설계하였다. 또한 도파광과 MW간의 위상 속도를 정합시키고 MW의 특성임피던스를 50Ω으로 맞추기 위하여, CPW 전극의 입·출력단 및 변조영역을 SOR을 이용하여 수치해석하였다.

z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판에 Ti를 내부확산하여 형성된 Mach-Zehnder 간섭기 위에, 전기 도금 공정으로 CPW 전극을 탑재함으로써 광변조기를 제작하였다.

제작된 CPW 전극의 반사특성은 12 GHz 이하의 주파수에서 -15 dB이하를 유지하였고, 투과특성은 7 GHz까지 -3 dB 이상을 나타내었다. 제작된 소자의 삽입손실은 -3.2 dB 정도이며, 12 GHz 이상의 3 dB 변조대역폭을 갖는 것으로 측정되었다.

MW의 큰 감쇠상수로 인하여 광대역의 투과특성을 얻지 못하였으며, 고주파로 갈수록 반사손실 또한 크게 나타났다. 이러한 감쇠상수는 주로 도금과정에서 발생한 거친 전극표면과 불균일한 전극패턴에 의한 것으로 추정되며, 고주파에서의 반사손실 증가는 패키징 과정에서 발생한 커넥터와 변조기 칩과의 접합 불량 및 CPW 전극의 bending에 의한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2003년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] D. W. Dolfi et al., "50GHz velocity-matched, broad wavelength LiNbO<sub>3</sub> modulator with multimode active section", *Integrated Photonics Research*, Pd2, 1992.
- [2] M. Rangaraj, T. Hosoi, and M. Kondo, "A wide-band Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator with conventional coplanar waveguide type electrode", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 9, pp. 1020-1022, 1992.
- [3] Xiang Zhang and Tanroku Miyoshi, "Optimum design of coplanar waveguide for LiNbO<sub>3</sub> optical modulator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 3, pp. 523-528, 1995.
- [4] Shih-Jung Chang, Ching-Ling Tsai, Yih-bin Lin, Ju-Feng Liu, Way-Seen Wang, "Improved electrooptic modulator with ridge structure in X-cut LiNbO<sub>3</sub>", *IEEE J. Lightwave Technol.* vol. 17, no. 5, pp. 843-847, 1999.
- [5] Kazuto Noguchi, Osamu Mitomi, Hiroshi Miyazawa, and Shunji Seki, "A broadband Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator with a ridge structure", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 1164-1168.
- [6] Osamu Mitomi, Kazuto Noguchi, Hiroshi Miyazawa, "Design of ultra-broadband LiNbO<sub>3</sub> Optical modulators with ridge structure", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 9, pp. 2003-2007, 1995.
- [7] Jong Chang Yi, Sun Ho Kim, Sang Sam Choi, "Finite-Element Method for the Impedance Analysis of Travelling-wave Modulators", *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 817-822, 1990.
- [8] Tadasi Sueta, and Masayukizutst, "Integrated Optic Devices for Microwave Applicatons", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 477-481, 1990.
- [9] Kenji Kawano, "High-speed Shielded Velocity-Matched Ti:LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulator", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 2466-2475, 1993.
- [10] S. Forouhar, G. E. Betts, W.S.C. Chang, "Effects of water vapor on modes in Ti-indiffused LiNbO<sub>3</sub> planar waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 3, 1984.
- [11] J. L. Jackel, "Suppression of outdiffusion in titanium diffused LiNbO<sub>3</sub> : a review", *J. Opt. Commun.* 3, pp. 82-85, 1982.
- [12] 한영탁, 이우진, 고병국, 이병권, 김창민, "Mach-Zehnder 형 진행파 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기의 제작 및 변조응답 추정", *대한전자공학회논문지*, 제38권, SD 제11호, 2001.
- [13] C. M. Kim, R. V. Ramasswamy, "Overlap integral factors in integrated optic modulators", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-7, no. 7, pp. 1063-1070, 1989.
- [14] 정석원, 김창민, "진행파형 광변조기의 taper 영역의 전극 설계 : SOR 기법", *한국광학회지*, 제7권 1호, pp. 77-86, 1996.
- [15] 한상필, 김창민, "Ti:LiNbO<sub>3</sub> 진행파 광변조기의 FEM 전극해석 및 대역폭 예측", *전자공학회논문지*, 제32권 A 제2호, 1995.

**CPW travelling-wave electrodes, Mach-Zehnder type Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator**

Joong-Ho Pi<sup>†</sup>, Eun-Joo Jung, Jung-Sung Choi, and Chang-Min Kim

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

<sup>†</sup>*E-mail: pjh2918@hammail.net*

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

We have fabricated a LiNbO<sub>3</sub> travelling-wave optical modulator. The travelling-wave modulator consisted of M-Z(Mach-Zehnder) interferometer and CPW(Coplanar Waveguide) travelling-wave electrodes. Design of CPW electrodes were performed by SOR(Successive Over Relaxation) to obtain the conditions of Microwave effective index and impedance matching. The fabricated modulator had -3.2 dB insertion loss, and S<sub>11</sub> below -15 dB up to 12 GHz, S<sub>21</sub> better than -3 dB upto 7 GHz. It turned out that the optical response showed the 3 dB bandwidth of above 12 GHz.

OCIS Codes : 250.7360.