

論文2001-38SD-11-4

Mach-Zehnder형 진행파 Ti:LiNbO₃ 광변조기의 제작 및 변조응답 추정

(Fabrication of Mach-Zehnder Type Traveling-Wave Ti:LiNbO₃ Optical Modulator and Estimation of Frequency Response)

韓榮鐸*, 李禹眞**, 高秉國**, 李丙權***, 金昌敏**

(Young-Tak Han, Woo-Jin Lee, Byung-Guk Ko, Byung-Kwon Lee,
and Chang-Min Kim)

요약

Mach-Zehnder 간섭기를 이용한 Ti:LiNbO₃ 진행파 광변조기를 설계 및 제작하였다. FDM을 이용하여 광도파로의 최적 설계치를 추출하였다. CPW 진행파전극의 MW 유효굴절률 및 특성임피던스를 정합시키기 위하여 taper 영역의 입·출력단에서는 CMM을, 변조영역에서는 FEM으로 설계를 수행하였다. 제작된 소자의 MW 특성으로는, S 파라미터로부터 감쇠상수 $\alpha_m = 0.05426 \sqrt{f}$, MW 유효굴절률 $N_{eff} = 2.2025$, 특성임피던스 $Z_c = 39 \Omega$ 이 추출되었다. MW 특성으로부터 계산한 주파수응답 $R(\omega)$ 의 3 dB 변조대역폭은 ~10 GHz으로 예측되었다.

Abstract

Mach-Zehnder type traveling-wave Ti:LiNbO₃ optical modulators were designed and fabricated. Optimum parameters of optical waveguides were calculated by means of the FDM. Design of CPW traveling-wave electrodes were performed by the FEM in the active region and by the CMM in the input/output section to obtain the conditions of MW effective index and impedance matching. From the measured S parameters, MW characteristics of the traveling-wave electrodes were extracted to be $\alpha_m = 0.054258 \sqrt{f}$, $N_{eff} = 2.2025$, and $Z_c = 39 \Omega$. The calculated optical response $R(\omega)$ showed the 3 dB bandwidth of 10 GHz.

* 正會員, 韓國電子通信研究院 실리카光部品팀
(Silica Optical Component Development Team,
Electronics and Telecommunications Research Institute)
** 正會員, 서울市立大學校 電子電氣工學部科
(Dept. of Electronics Eng., The University of Seoul)
*** 正會員, 서울正修技能大學校

(Seoul-Jeongsu Polytechnic College)

※ 본 연구는 2000년도 정보통신 연구관리단 대학기초
연구지원(2000-149-01) 및 2000년도 학술진흥재단
선도연구자 지원(E00187)에 의하여 수행되었음.
接受日字:2001年4月4日, 수정완료일:2001年10月15日

I. 서 론

인터넷 및 각종 통신시스템의 발달로 인하여 세계는 정보화 사회로 나아가고 있으며 이에 발 맞추어 초고속, 대용량의 광대역 광통신이 핵심기술로 등장하고 있다. 이중 고속 광변조기는 광대역 광통신 시스템과 신호처리 시스템에 중요한 필수소자이다. 고속변조 및 광대역 동작을 위해서 LiNbO₃ 변조기에 진행파(traveling-wave)전극의 사용이 필수적이며^[1-3], 효과적인 변조를 위한 광변조기의 가장 중요한 특성은 낮은 구동전압($V\pi$)과 광대역 3 dB 변조대역폭이다. 일반적으로 변조대역폭과 구동전압사이에는 tradeoff가 있는 것으로 알려져 있으며^[4,5], 지금까지 이러한 요구조건을 만족시키기 위한 여러가지 시도들이 행해져왔다^[6-10].

광변조는 내부변조와 외부변조로 나누어지는데, 초고속의 광변조를 위해서는 외부변조가 필연적으로 요구된다. 외부 광변조기의 구조는 광결합기와 진행파전극으로 구성되어있다. 광결합기의 구조는 방향성결합기, Y-분기형 결합기, 세도파로형 결합기^[11-13], M-Z(Mach-Zehnder)형 결합기 등이 있으며, 이중 M-Z형 결합기는 결합길이에 관계없이 인가전압을 조절함으로써 좋은 소멸비(extinction ratio)를 얻을 수 있는 장점이 있다. 진행파형 전극구조로는 CPW(coplanar waveguide)와 ACPS(asymmetric coplanar strip)형으로 구분되어지는데 대체로 손실이 낮고 특성임피던스가 50 Ω에 가까운 CPW형 전극구조가 선호되고 있다. 전극의 양끝은 테이퍼 구조로 되어있어서 MW 입·출력포트와 커넥터간의 결합을 용이하게 한다.

LiNbO₃ 광변조기의 변조대역폭은 주로 도파광과 마이크로파(MW) 변조신호와의 진행속도 부정합, MW 전파손실, 특성임피던스 부정합에 제한을 받는다^[2-10]. 위상속도 부정합은 MW 주파수에서 LiNbO₃기판의 높은 유전률에 기인하고^[9,10], MW 전파손실은 전극의 도체손실, 유전체 손실, LiNbO₃기판에 생기는 고차모드 및 금속 패키지(package) 내부에 존재할 수 있는 캐비티에 의한 공진에 기인한다^[13,14]. 광대역 변조를 위해서 MW 유효굴절률은 변조영역에서 광파의 굴절률인 2.15(z-cut, $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ TM 모드입사) 근처에 정합되어야 하고, 전극의 변조영역, bending 영역, taper 구조로 된 입·출력영역의 MW 특성임피던스는 변조신호의 반사손실을 최소화할 수 있도록 외부회로의 특성임피던스

인 50 Ω으로 정합 되어야 한다. 따라서, 광대역 진행파 광변조기 설계 시 고려할 사항으로는 도파광과 변조신호와의 위상속도 정합, 낮은 구동전압, 전극의 특성임피던스를 50 Ω으로 정합 시키는 것 등을 포함하고 있다. 그러나 실제로 이러한 모든 요구조건을 동시에 만족시키는 것은 어렵고 tradeoff를 고려해야만 한다.

SiO₂ 박막은 광파의 TM 모드 전파손실을 줄이기 위하여 도입되었는데, 이 박막의 두께를 조절함으로써 도파광과 변조신호의 위상속도 부정합과 MW 특성임피던스 부정합의 두 문제를 동시에 해결하고자 하는 노력이 꾸준히 진행되어 왔다^[3-10,14-16]. 특히, 위상속도를 정합 시키기 위하여 전극의 두께를 높이거나, 기판에 홈을 내거나(substrate grooving)^[16,17], 전극둘레를 차폐(shielding)하거나^[18], SiO₂ 박막을 에칭하는 등^[19] 여러 가지 방법들이 제안되었다. 전극의 전파손실은 두꺼운 금(Au) 전극을 형성시킴으로써 전극 횡단면의 면적을 늘려 저항성분을 줄이고, 또한 기판의 두께를 얇게 함으로써 MW 고차 모드전파에 의한 손실을 줄이거나 과 금속 패키지의 바닥을 가급적 멀리하는 방안이 제안되고 있다^[14].

본 논문에서는 z-cut Ti:LiNbO₃ M-Z형 광도파로와 CPW 구조의 진행파전극으로 구성된 광변조기를 설계 및 제작을 하였다. FDM(finite difference method)을 이용하여 광도파로의 최적 설계치를 추출하였다. 테이퍼(taper)영역의 입·출력단에서는 CMM(conformal mapping method)을^[20,21], 변조영역에서는 FEM(finite element method)으로^[22-24] CPW 진행파전극의 MW 유효굴절률 및 특성 임피던스를 정합시키는 구조를 설계하였다.

광변조기의 제작과정은 다음과 같다. z-cut LiNbO₃ 기판상에 열증착법(thermal evaporation), 표준사진식판법(standard photolithography)을 이용하여 광도파로의 7 μm폭 Ti 패턴을 형성한 후, 1050 °C에서 8 시간동안 내부확산 하였다. PECVD 공법을 사용하여 1.6 μm의 SiO₂ 박막을 증착하였으며, 열증착법으로 기저금속(base metal)인 크롬(Cr)과 금을 차례로 증착하였다. 진행파전극의 금 성장을 위하여 전기분해 공법이 사용되었고, 습식각 방법을 이용하여 기저금속을 제거하였다.

제작된 소자의 성능 측정은 다음과 같이 수행되었다. 광원으로 1.3 μm LD를 사용하였고 도파로의 입력 부분에 PMF(polarization maintaining fiber), 출력부분에는 렌즈와 IR Vidicon 카메라를 이용하여 광이 도파됨을

확인하였다. 제작된 소자의 MW 특성을 얻기 위하여 Network Analyzer를 이용하여 진행파전극의 S 파라미터를 측정하고, 이들 S 파라미터로부터 감쇠상수 a_m , MW 유효굴절률 N_{eff} , 특성임피던스 Z_c 를 추출하였다. MW 특성으로부터 광의 예상 주파수응답 특성 곡선을 이론적으로 계산하였다.

II. Ti:LiNbO₃ 광도파로의 모델링 및 도파해석

1. 굴절률분포

그림 1은 LiNbO₃기판내부에 Ti strip이 내부확산 되어있는 모습을 나타낸 것이다. 확산형 광도파로의 굴절률분포는 수평방향으로는 Gaussian 함수의 적분형으로, 깊이방향으로는 Gaussian 함수로 가정한다^[21]. 그림 1(b)를 보면 내부확산 후 LiNbO₃의 기판표면이 약간 부풀어 있는 모습을 볼 수 있는데 이는 Ti가 내부확산

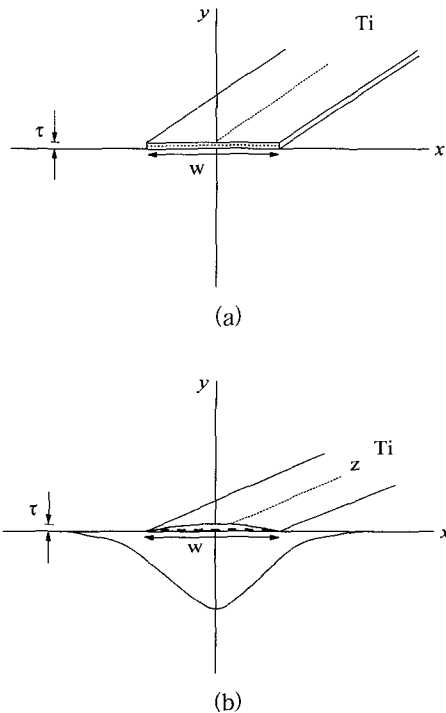


그림 1. 채널형 광도파로 형태 (τ (Å): Ti 두께, w (μ m): Ti 폭) (a) Ti 내부확산 전의 모습 (b) Ti 내부확산 후의 모습

Fig. 1. Channel type optical WG (τ (Å): Ti thickness, w (μ m): Ti width) (a) Before Ti in-diffusion (b) After Ti in-diffusion.

되면서 일어나는 자연적인 현상이다. Ti strip이 모두 내부확산이 일어날 수 있도록 충분한 시간동안 확산이 진행된 경우 굴절률 분포는 다음과 같다

$$\begin{aligned} \Delta n(x, y) &= \frac{dn}{dc} c(x, y) \\ &= \Delta n_0 \exp\left[-\left(\frac{y}{d_y}\right)^2\right] \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x+w/2}{d_x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-w/2}{d_x}\right) \right] / \operatorname{erf}\left(\frac{w/2}{d_x}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta n_0 &= \frac{dn}{dc} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tau}{d_y} \operatorname{erf}\left(\frac{w/2}{d_x}\right), \\ d_x &= 2(D_x t)^{1/2}, \quad d_y = 2(D_y t)^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

$c(x, y)$ 는 Ti의 농도분포이며, dn/dc 는 농도의 증가분에 따른 굴절률의 증가분을 의미한다. D_x, D_y 는 확산계수, t 는 확산시간, d_x, d_y 는 확산거리이다.

2. 광도파로의 V-b 분산곡선

그림 2는 FDM을 이용하여 z-cut Ti:LiNbO₃ 광도파로에 $T=1050^\circ\text{C}$, $t=8\text{ h}$, $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$, TM 모드 입사의 경우, Ti의 폭 w 를 $5\ \mu\text{m}$ 에서 $8\ \mu\text{m}$ 까지 $1\ \mu\text{m}$ 씩 증가시키고, 두께 τ 는 각 폭에 대해서 $800\ \text{Å}$, $850\ \text{Å}$, $900\ \text{Å}$, $950\ \text{Å}$ 로 변화시켜 가면서 V-b곡선을 그린 것이다. 그림 2에서의 b 와 V 는 각각 $b = (n_{eff}^2 - n_s^2) / (2n_s \Delta n)$, $V = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{2n_s \Delta n}$ 이고, 해석 시 $n_s = 2.15$, $dn/dc = 0.625$ 로 놓았다^[20].

광통신 소자의 설계에 있어 단일모드 조건을 만족하도록 해야하지만 광섬유와 도파로를 피그테일링(pig-

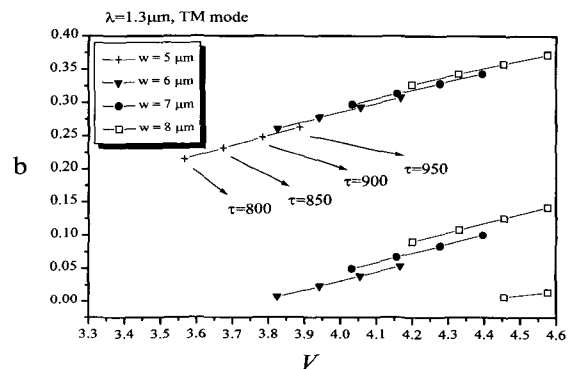


그림 2. z-cut Ti:LiNbO₃ 광도파로 V-b 분산곡선
Fig. 2. V-b dispersion curve of z-cut Ti:LiNbO₃ optical WG.

tailing)할 때 모드 부정합 손실을 고려하게 되면 오히려 다모드(multi mode) 도파로로 설계하는 것이 결합 효율을 향상시킬 수 있다. 광섬유의 코어직경 크기를 고려하여 도파로를 다모드로 설계한 후 피그테일링 시 광섬유모드를 도파로의 기본모드(fundamental mode)에 정렬하게 되면 결합손실이 줄어들고 단일모드에 비하여 상대적으로 b 값이 커지게 되므로 전송손실도 줄어든다.

이상과 같은 해석을 통해서 본 논문에서는 $w=7 \mu\text{m}$, $r=900 \text{ \AA}$ 를 채택하였으며, 이는 그림 2에서 $V=3.24$ 에 해당한다.

3. Mach-Zehnder 결합기의 설계

Mach-Zehnder 결합기는 방향성결합기나 Y-분기 방향성결합기에서 두도파로 간의 광 결합 현상을 이용하는 것과 달리 두도파로 간의 직접적인 광 결합 없이 두도파로 각각의 위상차를 이용한다. 여기서, 두도파로는 동일한 구조를 갖는다고 가정한다.

Mach-Zehnder 결합기의 동작원리는 다음과 같다. 전극에 전압이 인가되지 않으면 입사된 광은 두도파로로 분기되어 들어가고, 같은 거리만큼 진행한 후 두도파로가 다시 만나는 지점에서 두 광파는 위상차가 없기 때문에 서로 합쳐져 출력된다. 한편, 전극에 전압을 인가하면 push-pull 작용으로 말미암아 광파는 각각 서로 다른 굴절률을 느끼면서 진행하게 된다. 임의의 거리만큼 진행했을 때 두 광파의 위상은 180° 차이가 나며, 두도파로가 다시 만나는 지점에서 두 광파는 소멸된다.

대칭구조를 갖는 Mach-Zehnder 결합기의 구조에서 스위칭이 일어나기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\Delta\beta \cdot L = \pi \tag{3}$$

여기서

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \tag{4}$$

z -cut LiNbO₃기판의 경우 외부전계 E_2 에 대한 굴절률 변화 Δn 은 $\Delta n = \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_2$ 이다.

그림 3에 M-Z 광도파로, 진행파 전극패턴, 그리고 변조영역에서의 전계분포가 그려져 있다. $E_2 = E_i$ ($i=1,2$)에 해당되며, 도파로에 대한 각 전계의 방향성을 유의할 필요가 있다.

$\Delta\beta$ 는 인가 전압 V_{sw} 에 대하여 다음으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= k_o (\Delta n_1 - \Delta n_2) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_1 \right) - \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_2 \right) \tag{5} \\ &\approx \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} (\Gamma_1 + \Gamma_2) \frac{V_{sw}}{S} \end{aligned}$$

S 는 두 전극간의 간격이며, Γ_i 는 인가전계와 도파광의 중첩인자이고, 모의전산 결과에 의하면 0.2~0.3 정도이다. 인가전계의 방향성으로 말미암은 push-pull 효과에 의하여 E_2 의 부호가 바뀐다. 식 (3)을 식 (5)에 대입해서 정리하면 다음과 같이 전극길이와 입력전압 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$L = \frac{\lambda \cdot S}{n_e^3 r_{33} (\Gamma_1 + \Gamma_2) V_{sw}} \tag{6}$$

$\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 수직편광 입사에 대하여 전극의 간격 $S=18 \mu\text{m}$, $n_e^3 r_{33} = 306 \times 10^{-6} \mu\text{m/V}$ 이고, 중첩인자 $\Gamma_1 = \Gamma_2 \approx$

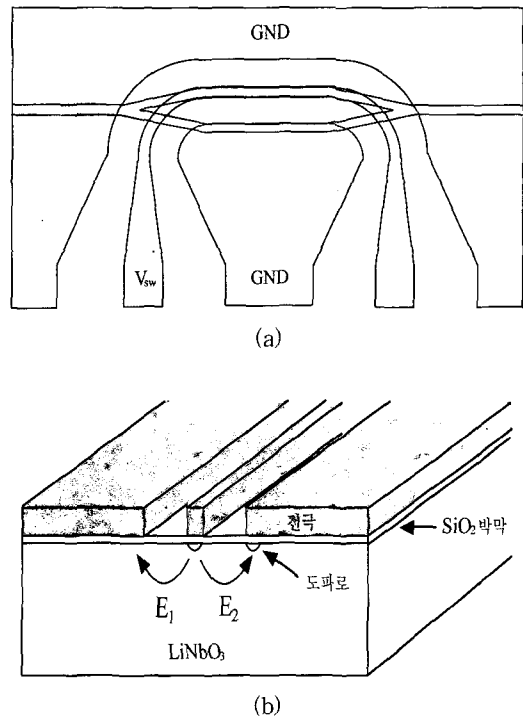


그림 3. 도파로 위에 전극이 형성된 모습 (a) 도파로위에 전극이 정렬된 모습 (b) 변조영역에서의 전계분포

Fig. 3. Electrodes pattern on optical WGs (a) Electrodes aligned with WGs (b) Electric field distribution.

0.273, 구동전압 $V_{sw}=5$ V로 예상하면 변조영역의 길이 $L=28000 \mu\text{m}$ 정도로 계산되어 진다. 여기서, 전극의 간격 S 는 MW 특성임피던스 50 Ω 과 유효굴절률 2.15의 정합이 고려된 값이다.

그림 4는 광도파로의 확산 전 Ti strip의 치수를 나타내고 있다.

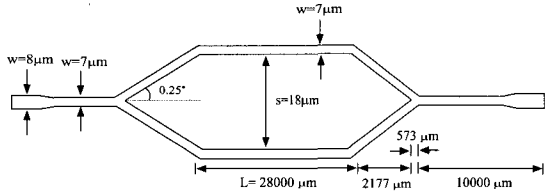


그림 4. 설계된 M-Z 광도파로 치수(μm)
Fig. 4. Dimensions of a designed M-Z optical WG(μm).

III. CPW 진행파전극 설계

1. CMM에 의한 입·출력단 전극설계

MW가 테이퍼영역 및 변조영역까지 신호의 왜곡 및 반사손실 없이 전달되기 위해서는 광변조기의 입·출력단, 변조영역 전체에 걸쳐 특성임피던스 정합이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 변조영역에서의 특성임피던스 설계는 FEM을 이용하였으며, 입·출력단에서의 특성임피던스 설계는 CMM(conformal mapping method)을 사용하였다.

이 경우 중앙전극의 폭은 MW 포트와 결합을 쉽게 하기 위해서 대체로 $\sim 300 \mu\text{m}$ 이상이 되어야 한다. 입·출력단에서의 중앙전극 폭(W) 및 전극간격(S)은 전극

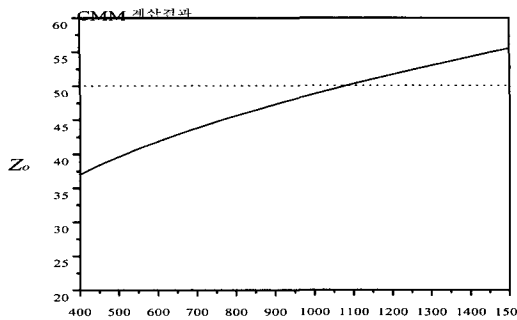


그림 5. 전극간격(S)에 따른 입·출력단에서의 Z_c
($W=300 \mu\text{m}$, $T=12 \mu\text{m}$)
Fig. 5. Z_c v.s S in the input/output section
($W=300 \mu\text{m}$, $T=12 \mu\text{m}$).

두께 및 SiO_2 박막의 두께에 비해 대단히 크므로 FEM 적용시 방대한 양의 메모리와 계산시간이 소요되고 그 정확성도 신뢰할 수가 없게 된다. 이러한 이유로 입·출력단에서는 CMM을 이용하여 특성임피던스를 계산하였으며^[20,21], 이 방법은 전극두께 및 SiO_2 박막의 두께가 전극 폭 및 전극간격에 비해 무시할 수 있을 경우, 더욱 정밀도를 제공한다.

그림 5는 SiO_2 박막 두께를 무시하고 전극폭과 전극 두께를 각각 $300 \mu\text{m}$, $12 \mu\text{m}$ 로 고정된 상태에서 전극간격을 변화시키면서 특성임피던스를 계산한 것이다. 전극간격이 $\sim 1100 \mu\text{m}$ 부분에서 50 Ω 을 만족하는 것을 알 수가 있다.

2. FEM에 의한 변조영역 전극설계

A. FEM 이론 및 등전위 분포

그림 6은 SiO_2 박막을 증착한 CPW 진행파전극 구조의 단면이다. Metal box는 금속 패키지 몸체에 해당하며 해석영역에서 전위가 0 V인 부분을 나타낸다. 그림 6과 같은 CPW 전극구조를 2차 삼각형 요소를 이용한 FEM으로 해석을 하였다.

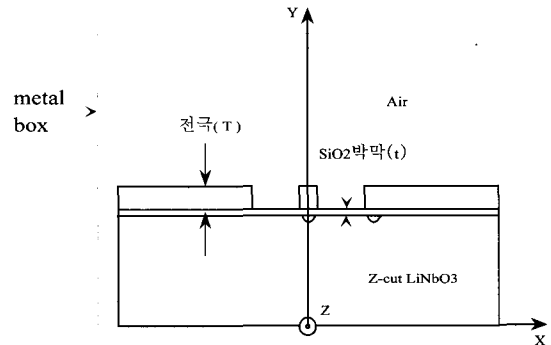


그림 6. FEM 해석을 위한 CPW 진행파전극의 단면도
z-cut LiNbO_3 의 MW 유전률 : $\epsilon_x=43$, $\epsilon_y=28$
 SiO_2 박막의 MW 유전률 : $\epsilon_x=\epsilon_y=3.9$

Fig. 6. Cross section view of CPW traveling-wave electrodes.

z-cut LiNbO_3 : $\epsilon_x=43$, $\epsilon_y=28$,
 SiO_2 박막의 MW 유전률 : $\epsilon_x=\epsilon_y=3.9$

CPW 진행파전극에서 존재하는 해를 유사(quasi) TEM 모드라고 가정하면 전위는 Laplace 방정식을 만족한다. 일반적으로 비등방성 매질에서 Laplace 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

$V(x, y)$ 는 전위분포를 나타내며 다음과 같이 표현하기로 한다.

$$V(x, y) = \sum_{j=1}^6 V_j \psi_j(x, y) \quad (8)$$

여기서, V_j 는 2차 삼각형 요소의 각 절점 (x, y) 에서의 전위 값이며, ψ_j 는 $\psi_j(x_i, y_i) = \delta_{ij}$ 의 특성을 가지는 선형 보간(형상)함수이다. 식 (8)을 식 (7)에 대입한 후 FEM을 적용하면 식 (7)은 다음과 같은 지역 유한요소 행렬식으로 표현된다^[22-24].

$$[K^{(e)}] \{V^{(e)}\} = \{F^{(e)}\} \quad (9)$$

여기서,

$$[K_{ij}^{(e)}] = \sum_{j=1}^6 \left\{ \int_{\mathcal{Q}^e} \left[\epsilon_x \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \epsilon_y \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} \right] dx dy \right\} \quad (10a)$$

($i, j = 1, 2, \dots, 6$)

$$\begin{aligned} \{F_{ij}^{(e)}\} &= \oint_{\Gamma^e} \epsilon_n \frac{\partial V}{\partial n} \psi_i dl \\ &= - \oint_{\Gamma^e} \epsilon_n E_n \psi_i dl \end{aligned} \quad (10b)$$

\mathcal{Q}^e 는 요소분할 영역을, Γ^e 는 요소분할 영역의 둘레를 의미한다. 첨자 n 은 요소간 경계 면에 대하여 수직인 방향을 나타낸다. 공기에 대해서 $\epsilon_x = \epsilon_y = 1$ 이고 나머지 영역에 대해서는 해당 유전율을 적용한다. 지역행렬(local matrices)식을 전역행렬(global matrices)식으로 합성한 후 $\{V^{(e)}\}$ 에는 DBC(Dirichlet boundary condition), $\{F^{(e)}\}$ 에는 NBC(Neumann boundary condition)를 적용한다. 이렇게 경계조건이 적용된 전역

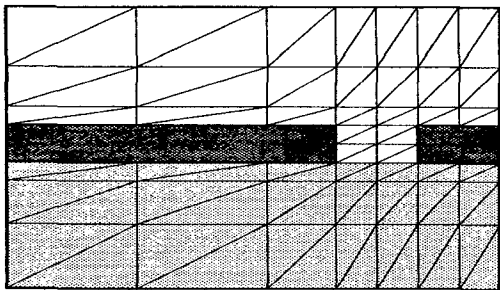


그림 7. CPW 진행파전극 구조의 요소분할 예
Fig. 7. Finite-element discretization of the CPW traveling-wave electrodes.

행렬식을 반복법(iterative method)에 의해서 전위분포를 구하였다.

그림 7은 CPW 전극구조에 대하여 요소분할 한 것이다. 메모리와 계산의 효율성을 고려하여 해석평면을 반으로 나누었고 비 균일하게 분할하였다. 설계 시 해석의 정확성을 위해서 8,000개 이상의 노드점을 확보하였고 전극과 SiO₂ 박막 및 패키징(packaging)했을 때의 실제 치수를 고려하여 해석하였다.

그림 8은 전극폭 7 μm , 전극간격 18 μm , 전극두께 12 μm , SiO₂박막 두께 1.6 μm 인 CPW 진행파 전극구조의 등전위분포를 나타낸 것이다.

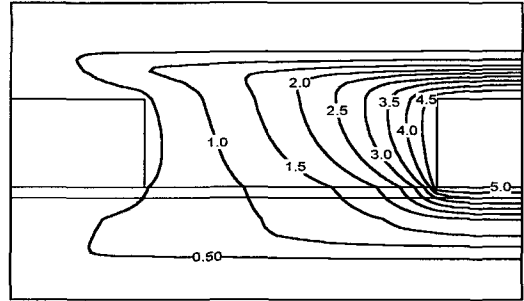


그림 8. FEM으로 계산된 CPW 진행파전극 구조의 등전위 분포

Fig. 8. Equipotential distribution calculated by the FEM for the CPW traveling-wave electrodes.

B. MW 특성임피던스 및 유효굴절률

구하여진 전위분포로부터 발산정리(divergence theorem)를 이용하면 다음과 같이 정전용량을 구할 수가 있다.

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{V_o} = \frac{\int_V \nabla \cdot D dv}{V_o} = \frac{\oint_S \epsilon_n E \cdot dl}{V_o} \quad (11) \\ &= \frac{1}{V_o} \oint_S \epsilon_n \frac{dV}{dn} dl \end{aligned}$$

$$V(x, y) = \sum_{j=1}^6 V_j \psi_j \quad (12)$$

V_o 는 인가전압이고 s 는 중앙전극을 둘러싼 임의의 적분경로이다. 식(11b)에서처럼 구해진 전위 값들에 대하여 사각형 보간함수 ψ_i 를 이용하여 전위를 표현한 후 정전용량 C_o, C_m 을 구하였다. 여기서 C_o 는 전극구조 내의 유전체(LiNbO₃ 기판, SiO₂ 포함)를 모두 공기로 대체시켰을 때의 정전용량이고, C_m 는 원래구조의 정전

용량이다.

무손실을 가정하는 경우 $C_m = \epsilon_{re} C_o$, $v_m = \omega / \beta = c_o / \sqrt{\epsilon_{re}}$ 를 이용하면 MW 특성임피던스 Z_c 및 유효굴절률 N_{eff} 는 다음과 같이 모두 전극 정전용량의 함수로 표현 할 수 있다^[14,21,22].

$$Z_c = \frac{1}{c_o \sqrt{C_o C_m}}, \quad N_{eff} = \sqrt{\frac{C_m}{C_o}} \quad (13)$$

여기서 c_o 는 진공 중에서의 광속이다.

C. 모의전산

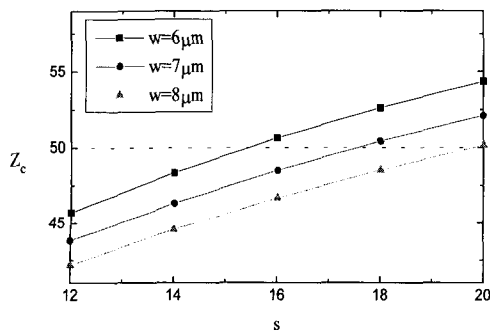
MW 외부회로의 특성임피던스 $Z_c=50 \Omega$ 이고 LiNbO₃ 내의 도파로에서 광의 유효굴절률 $n_{eff}=2.15$ 이기 때문에 초고속 광변조 대역폭을 얻기 위해서는 CPW 진행파전극의 MW 특성임피던스 및 유효굴절률을 각각 $Z_c=50 \Omega$, $N_{eff}=2.15$ 로 정합 시켜야한다. 이러한 정합조건을 만족하는 설계치를 찾기 위하여 전극폭 W, 전극간격 S, 전극두께 T, SiO₂ 박막두께 t등을 각각 변화시키면서 FEM 해석을 수행하였다.

표 I는 FEM 모의전산에 사용된 LiNbO₃ 기판과 SiO₂ 박막의 파라미터를 나타낸 것이다.

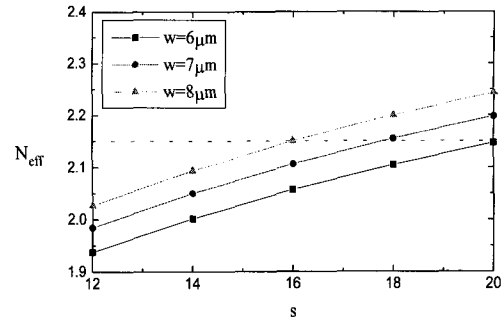
그림 9는 FEM에 의하여 계산된 CPW 전극구조의

표 1. 모의전산에 사용된 각 재료의 파라미터
Table 1. Parameters of each material for simulation.

재료	굴절률 (광대역 $\lambda=1.3\mu m$)	비유전율(ϵ_r) (Microwave 대역)	두께
원충막	SiO ₂ n = 1.457	$\epsilon_x = \epsilon_y = 3.9$	미지수
기판	LiNbO ₃ $n_o=2.229, n_e=2.150$	$\epsilon_x=43, \epsilon_y=28$	1000 μm



(a)



(b)

그림 9. 전극간격에 따른 Z_c , N_{eff} (T=12 μm , t=1.6 μm)
(a) 특성임피던스(Z_c) (b) MW 유효굴절률(N_{eff})

Fig. 9. Z_c , N_{eff} vs. electrode separation(T=12 μm , t=1.6 μm)
(a) Characteristic impedance(Z_c) (b) MW effective index(N_{eff}).

특성임피던스 및 유효굴절률을 나타낸 것이다. 그림 9로부터 전극폭 $W=7 \mu m$, 전극간격 $S=18 \mu m$, 전극두께 $T=12 \mu m$, SiO₂박막두께 $t=1.6 \mu m$ 인 경우에 $Z_c=50 \Omega$, $N_{eff}=2.15$ 를 만족시키고 있음을 알 수 있다. 표 II는 이상의 해석과정으로부터 계산된 CPW 진행파전극의 설계치를 나타낸 것이고, 그림 10에는 설계된 전극구조의 단면이 그려져 있다.

표 2. CPW 진행파전극의 각 파라미터
Table 2. Parameters of CPW traveling-wave electrodes.

중앙 전극폭 W(μm)	전극간격 S(μm)	전극 두께 T(μm)	SiO ₂ 박막 두께 t(μm)
7	18	12	1.6

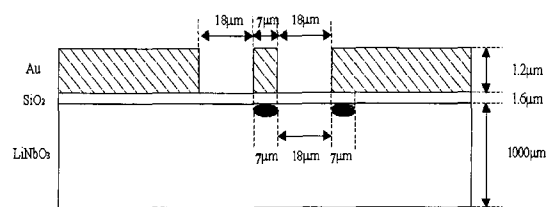


그림 10. 설계된 전극구조의 단면도
Fig. 10. Cross-section view of designed electrodes.

IV. 진행파 광변조기의 주파수응답

1. MW 인가에 따른 변조영역 굴절률 변화

그림 11은 M-Z 간섭기와 CPW 전극으로 구성된 진행파 광변조기를 나타낸 것이다.

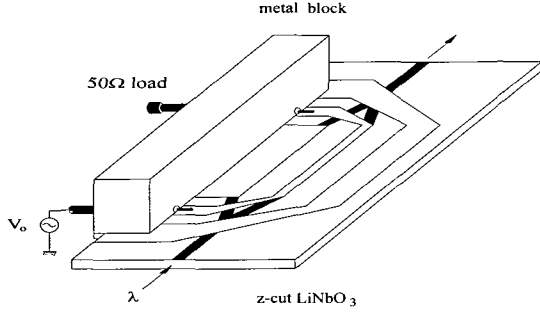


그림 11. 진행파 광변조기의 개략도

Fig. 11. Schematic diagram of a traveling-wave optical modulator.

MW 특성임피던스 Z_c , 유효굴절률 N_{eff} 그리고 광의 유효굴절률 n_{eff} 에 따른 광변조기의 변조대역폭을 정량화하기 위해 MW 전극을 그림 12의 등가 전송선로로 모델화 하였다.

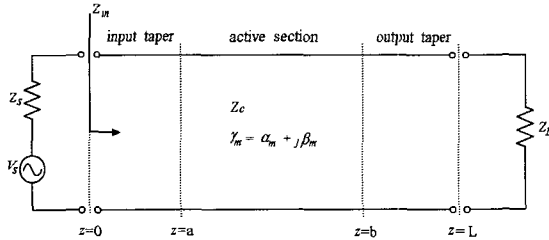


그림 12. 진행파전극의 등가 전송선로

Fig. 12. Equivalent transmission line of travelling-wave electrodes.

그림 12에서 V_s 및 Z_s 는 급전 동축케이블의 MW 전원과 특성임피던스를, Z_c 및 Z_L 은 각각 진행파전극의 특성임피던스와 종단부하의 임피던스를 나타낸다. γ_m 은 진행파전극의 전파상수, α_m , β_m 은 각각 감쇠상수, 위상상수를 의미한다.

광도파로를 따라 전파하는 도파관은 도파로 위에 놓인 전극을 따라 진행하는 MW에 의해 전기광학효과를 받게된다. 전송 선로를 따라 분포하는 도파관의 입장에서 본 상대 전위 $V'(z)$ 는

$$V'(\omega_m, z) = V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_s} \frac{1}{(e^{\rho^+ z} + \Gamma_L e^{-2r_m L} e^{\rho^+ z})} \quad (14)$$

여기서

$$\Gamma_L = (Z_L - Z_c)/(Z_L + Z_c) : \text{반사계수} \quad (15)$$

$$\gamma_m(\omega_m) = \alpha_m + j\beta_m : \text{MW 전파상수} \quad (16)$$

$$Z_{in}(\omega_m) = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh(\gamma_m L)}{Z_c + Z_L \tanh(\gamma_m L)} : \text{입력임피던스} \quad (17)$$

그리고

$$p^+ = -\alpha_m - j\frac{\omega_m}{c_o} (N_{eff} - n_{eff}) \quad (18)$$

$$p^- = \alpha_m + j\frac{\omega_m}{c_o} (N_{eff} + n_{eff}) \quad (19)$$

한편, 전극의 변조영역에서 일어나는 굴절률 변화 $\overline{\Delta n}(\omega_m)$ 는 균일한 전극에 대해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{\Delta n}(\omega_m) \triangleq c_{eo} \left| \int_a^b V'(\omega_m, z) dz \right| = c_{eo} \left| V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_s} \frac{1}{1 + \Gamma_L e^{-2r_m L}} \int_a^b g(\omega_m, z) dz \right| \quad (20)$$

여기서

$$g(\omega_m, z) = e^{\rho^+ z} + \Gamma_L e^{-2r_m L} e^{\rho^+ z} \quad (21)$$

$$c_{eo} = \frac{1}{2} n_{eff}^3 r_{33} \Gamma \frac{1}{S} \quad (22)$$

$\Delta n(0)$ 는 dc전압이 인가된 경우 굴절률 변화이고, a 와 b 사이의 거리는 MW와 광파가 상호작용을 하는 영역의 길이이다. r_{33} , Γ , 그리고 S 는 각각 전기광학 계수, 중첩 적분인자, 전극 사이의 간격을 의미하며, 계수 c_{eo} 는 전기광학 효과의 비례상수이다.

식 (20)~(22)를 통해 균일 전극인 경우 $\overline{\Delta n}(0)$ 에 대한 $\overline{\Delta n}(\omega_m)$ 의 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\overline{\Delta n}(\omega_m)}{\overline{\Delta n}(0)} = \left| \frac{Z_{in}}{Z_L} \frac{Z_L + Z_s}{Z_{in} + Z_L} \frac{1}{(b-a)(1 + \Gamma_L e^{-2r_m L})} \int_a^b g(\omega_m, z) dz \right| \quad (23)$$

2. Mach-Zehnder 광변조기의 주파수응답

Mach-Zehnder 광변조기의 변조영역(1)에서 스위칭 동작이 수행될 때, 두도파로 사이의 전파상수의 차이 $\Delta\beta(\omega_m)$ 과 굴절률 차이 $\overline{\Delta n}(\omega_m)$ 은 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\Delta\beta(0) \cdot l = \pi(\text{완전스위칭을 위한 bias}) \quad (24)$$

$$\Delta\beta(\omega_m) \approx k_0 \overline{\Delta n}(\omega_m) \quad (25)$$

일반적인 Mach-Zehnder 간섭기의 정규화 된 광 출력 세기 $I(\omega_m)$ 는 다음과 같다.

$$I(\omega_m) = \cos^2\left(\frac{\Delta\beta(\omega_m)l}{2} + \phi_0\right) \quad (26)$$

여기서

$$\Delta\beta(\omega_m) = \beta_1(\omega_m) - \beta_2(\omega_m) \quad (27)$$

주파수응답 $R(\omega_m)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$R(\omega_m) \triangleq \sqrt{\frac{I(\omega_m) - I_{\phi_0}}{I(0) - I_{\phi_0}}} \quad \text{여기서 } I_{\phi_0} = \cos^2 \phi_0 \quad (28)$$

ϕ_0 는 광 바이어스 점이고 I_{ϕ_0} 는 dc 바이어스에서 검출된 광 출력세기이다. 대칭 M-Z 간섭기에 전압이 인가되지 않았을 때 ($\Delta\beta=0$) 출력 세기는 1이므로, $\phi_0=0$ 인 경우 $I_{\phi_0}=1$ 이다. 그러면 식 (24)와 식 (25)를 이용하여 주파수응답 $R(\omega_m)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} R(\omega_m) &= \left| \frac{\cos^2 \frac{\Delta\beta(\omega_m)l}{2} - 1}{\cos^2 \frac{\Delta\beta(0)l}{2} - 1} \right|^{\frac{1}{2}} \\ &= \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\Delta\beta(\omega_m)}{\Delta\beta(0)}\right) \right| \\ &= \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\overline{\Delta n}(\omega_m)}{\overline{\Delta n}(0)}\right) \right| \end{aligned} \quad (29)$$

식 (29)의 $\overline{\Delta n}(\omega_m)$ 과 $\overline{\Delta n}(0)$ 의 표현식은 식 (20)~(23)으로부터 이용 가능하고 주파수응답을 dB로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다^[25].

$$20 \log R(\omega_m) : \text{dB-optical} \quad (30a)$$

$$20 \log R^2(\omega_m) : \text{dB-electrical} \quad (30b)$$

V. MW 전압인가에 대한 광 변조특성

1. 광도파 및 스위칭 실험

A. 단일모드 광도파

제작되어진 광결합기를 측정하기 위하여 광원으로 1.3 μm LD를 이용하여 광도파 실험을 하였다. 광도파

실험장치의 개략도가 그림 13에 도시되어 있다.

SMF(single mode fiber)로 피그테일링 된 1.3 μm LD에서 발생된 광을 편광기(polarizer)를 사용하여 TM모드만 통과시키고 모드를 계속 유지하기 위해 PMF가 사용되었다. 도파로에 TM모드로 편광된 광이 입사되어 도파로를 빠져나온 광은 40배 대물렌즈에 의해 IR Vidicon 카메라에 상이 맺히게 되는데, 이러한 상은 컴퓨터 모니터를 통하여 볼 수 있다. 그림 14는 전압이

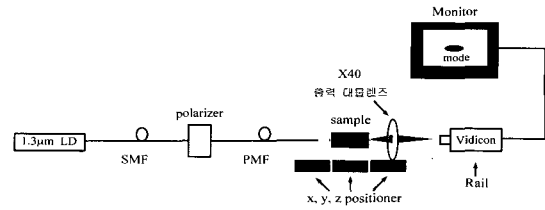
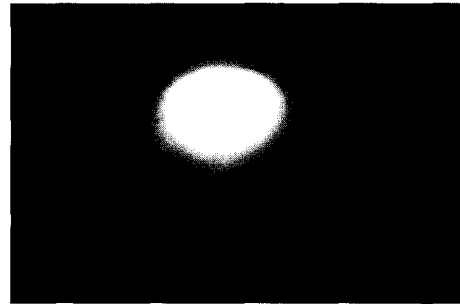
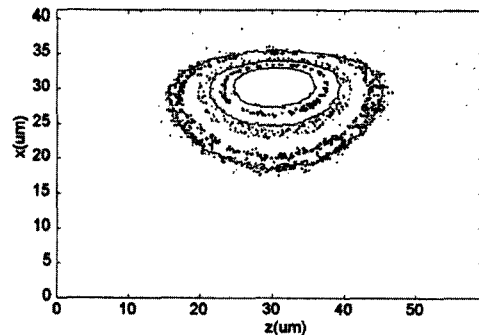


그림 13. 광 도파로 특성 측정장치

Fig. 13. Measurement system for optical WG characterization.



(a)



(b)

그림 14. 도파로의 near field 패턴 (a)IR Vidicon에 잡힌 도파모드 (b)도파모드의 contour

Fig. 14. Near field pattern of waveguides. (a) guided mode on IR Vidicon (b) contour of guided mode.

인가되지 않았을 때 광의 출력 모습을 나타낸 것이다.

B. 광스위칭 및 V_{π}

그림 13의 IR Vidicon 카메라 대신 Optical Powermeter를 사용하면 출력된 광의 세기를 측정 할 수 있다. 그림 15에는 인가 전압의 변화에 따른 출력의 변화를 도시하여 놓았다. 제작된 광변조기의 스위칭 전압은 6.5V, 소멸비는 27.74dB로 측정되었다.

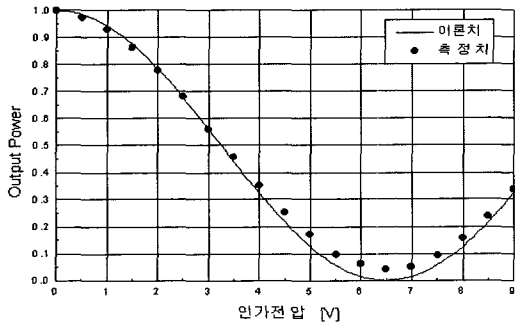


그림 15. 인가 전압 변화에 따른 광출력
Fig. 15. Output power vs bias voltage.

2. S-parameter 측정 및 진행파전극 파라미터 추출

A. S_{11}'

그림 16는 특성임피던스 Z_s , Z_L 인 커넥터에 특성임

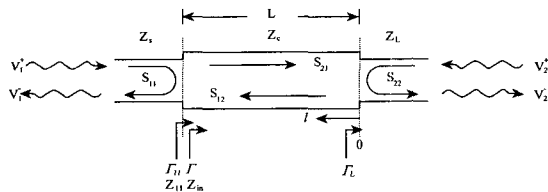


그림 16. 진행파전극의 S 파라미터
Fig. 16. S parameters of traveling-wave electrodes.

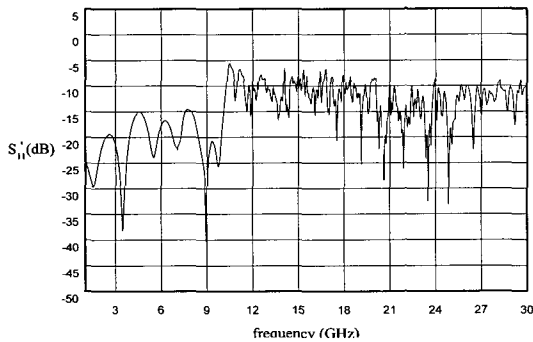


그림 17. MW 반사특성 S_{11}'
Fig. 17. MW reflection characteristic S_{11}' .

피던스 Z_c 인 전송선로가 연결되어 있을 때의 S 파라미터를 묘사한 것이다.

입력단에서의 Γ_{11} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} = S_{11}' = S_{11} - \frac{S_{11}S_{21}\Gamma_L}{S_{22}\Gamma_L - 1} \quad (31a)$$

$$\text{여기서, } \Gamma_L = (Z_L - Z_m)/(Z_L + Z_m) \quad (31b)$$

1) 진행파전극의 Z_c 추출

그림 17로부터 전극의 특성임피던스 Z_c 는 39 Ω 으로 계산된다. 추출된 값은 설계한 값 50 Ω 에서 많이 벗어나 있음을 알 수 있는데, 이는 V-connector와 전극의 입·출력단과의 연결상태 불량, 설계된 전극과 제작된 전극의 구조가 달라짐으로 인한 특성임피던스 부정확으로 추정된다.

2) MW 유효굴절률 N_{eff} 추출

MW가 소자의 길이가 L인 전극을 따라 진행할 때 $\psi_m(z) = e^{-j\beta_m L}$ 에서 위상변화가 생기며 주파수에 따른 소멸간섭, 보강간섭을 고려하면 MW의 유효굴절률 N_{eff} 는 다음과 같다.

$$N_{eff} = \frac{c_0}{2L\Delta f} \quad (32)$$

그림 17의 S_{11}' 곡선으로부터 MW의 유효굴절률은 25 GHz까지 평균 2.2025로 계산된다.

B. S_{21}'

S_{21} 의 순수한 의미는 출력단 정합의 V_2/V_1' 지만, 실제 Network Analyzer에서 측정되는 것은 S_{11} 에서와

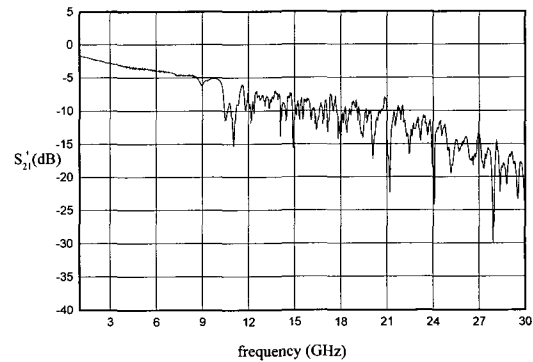


그림 18. MW 전달특성 S_{21}'
Fig. 18. MW transmission characteristic S_{21}' .

마찬가지로 S_{21}' 이고 다음과 같이 표현된다.

$$S_{21}' = V_2^- / V_1^+ = \exp(\alpha_m L) = \exp(\alpha_o \sqrt{f} L) \quad (33)$$

그림 18의 S_{21}' 곡선으로부터 전극의 감쇠상수 α_o 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{21}'(\text{dB}) = (8.686 \alpha_o \sqrt{f}) L \quad (34)$$

여기서 α_o 의 단위는 $/\text{cm}\sqrt{\text{GHz}}$ 이다. 그림 17로부터 감쇠상수를 구해보면 주파수에 따라 다르나 α_o 는 평균적으로 $0.05426 / \text{cm}\sqrt{\text{GHz}}$ 정도이다.

3. 광 변조특성

광변조기의 성능을 나타내는 지표인 광의 예상 주파수 응답 $R(\omega)$ 는 식 (29)와 식 (30)으로부터 구할 수 있다. 그림 19는 앞에서 추출한 Z_c , N_{eff} , α_o 등을 식 (29)~(30)에 대입해서 주파수 응답 $R(\omega)$ 를 이론적으로 계산한 것이다.

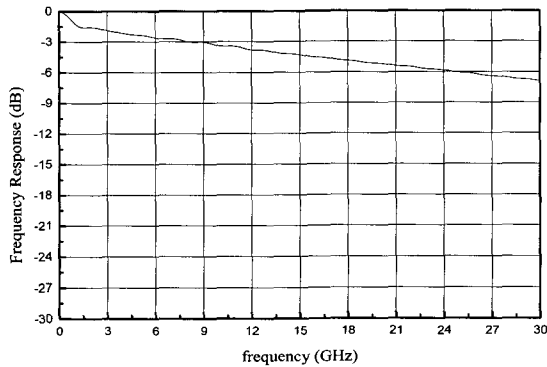


그림 19. 광변조기의 주파수 응답 $R(\omega)$ $Z_c=39 \Omega$, $N_{eff}=2.2025$, $\alpha_o=0.05426 / \text{cm}\sqrt{\text{GHz}}$

Fig. 19. Frequency response $R(\omega)$ of an optical modulator. ($Z_c=39 \Omega$, $N_{eff}=2.2025$, $\alpha_o=0.0542 / \text{cm}\sqrt{\text{GHz}}$)

그림 19로부터 예상 3 dB 변조대역폭은 ~ 10 GHz임을 알 수 있다.

VI. 결 론

Ti:LiNbO₃ M-Z형 광도파로와 CPW 구조의 진행파 전극으로 구성된 광변조기를 설계 및 제작을 하였다. FDM을 이용하여 z-cut Ti:LiNbO₃ 확산형 광도파로를

설계하였다. CPW 진행파전극의 MW 유효굴절률 및 특성임피던스 정합을 위하여 테이퍼영역의 입·출력단에서는 CMM을, 변조영역에서는 FEM으로 해석을 하였다. 광도파로 제작을 위하여 진공열증착, 표준사진석판, Ti 내부확산 공정을 사용하였으며, SiO₂ 박막과 진행파전극의 성장을 위하여 각각 PECVD와 전기분해 공법을 사용하였다.

제작된 소자의 성능 측정을 위해 광도파 실험과 Network Analyzer를 이용하여 진행파전극의 S 파라미터를 측정하였다. 측정된 S 파라미터 곡선들로부터 추출된 진행파전극 특성은 $\alpha_m=0.054258 \sqrt{f}$, $N_{eff}=2.2025$, $Z_c=39 \Omega$ 으로 나타났으며, MW 특성으로부터 계산한 주파수 응답 $R(\omega)$ 의 3 dB 변조대역폭은 ~ 10 GHz으로 예측되었다.

감쇠상수가 예상보다 크게 나왔고, 특성임피던스 역시 50 Ω 으로부터 크게 벗어나게 되어 기대이하의 대역폭을 얻게되었다. 감쇠상수가 큰 요인으로는 V-connector, 금속 패키지와 변조기 칩(chip)과의 silver paste bonding 불량, 도금된 전극표면의 거칠기와 패턴의 비균일성으로 예상되며, MW 유효굴절률 및 특성임피던스 부정합의 요인으로는 설계된 전극과 제작된 전극의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] D. W. Dolfi et al., "50GHz velocity-matched, broad wavelength LiNbO₃ modulator with multimode active section," Integrated Photonics Research, Pd2, 1992.
- [2] R. A. Becker, "Traveling-wave electro-optic modulator with maximum bandwidth-length product," Appl. Phys. Lett., 45(11), 1168-1170 (1984).
- [3] M. Rangaraj, T. Hosoi, and M. Kondo, "A wide-band Ti:LiNbO₃ optical modulator with a conventional coplanar waveguide type electrode," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 9, pp. 1020~1022, 1992.
- [4] X. Zhang and T. Miyoshi, "Optimum design of coplanar waveguide for LiNbO₃ optical modulator," IEEE Trans. Microwave Theory

- Tech., vol. 43, no. 3, pp. 523~528, 1995.
- [5] 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, 1998.
- [6] S.-J. Chang, C.-L. Tsai, Y.-B. Lin, J.-F. Liu, and W.-S. Wang, "Improved electrooptic modulator with ridge structure in X-cut LiNbO₃," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 843~847, 1999.
- [7] K. Noguchi, O. Mitomi, and H. Miyazawa, "Millimeter-wave Ti:LiNbO₃ optical modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 615~619, 1998.
- [8] W. K. Burns, M. M. Howerton, R. P. Moeller, A. S. Greenblatt, and R. W. McElhanon, "Broad-band reflection traveling-wave LiNbO₃ modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 805~806, 1998.
- [9] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "A broadband Ti:LiNbO₃ optical modulator with a ridge structure," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 1164~1168, 1995.
- [10] K. Atsuki and E. Yamashita, "Transmission line aspects of the design of broad-band electrooptic traveling-wave modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, no. 3, pp. 316~319, 1987.
- [11] 임영준, 김창민, "세도파로 광스위치의 설계 규칙," *대한전자공학회 논문지*, 제33권 A편, 제6호, pp. 197~205, 1996년 6월
- [12] C. M. Kim, Y. J. Im, "Switching operations of three-waveguide optical switches," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 170~174, Jan/Feb. 2000.
- [13] 김영문, 김창민, "두도파로 및 세도파로 방향성 결합기의 Crosstalk," *대한전자공학회 논문지*, 제 35권 D편, 제6호, pp. 54~62, 1998년 6월
- [14] 정석원, 김창민, "진행파 광변조기의 Taper영역 전극 설계 : SOR기법," *한국광학회 논문지*, 제7권, 제1호, pp. 78~86, 1996년 3월
- [15] O. Mitomi, K. Noguchi, and H. Miyazawa, "Design of ultra-broadband LiNbO₃ optical modulators with ridge structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 9, pp. 2203~2207, 1995.
- [16] J. C. Yi, S. H. Kim, and S. S. Choi, "Finite-element method for the impedance analysis of traveling-wave modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 817~822, 1990.
- [17] T. Sueta, and Masayukiizutsu, "Integrated optic devices for microwave applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 477~481, 1990.
- [18] K. Kawano, "High-speed shielded velocity-matched Ti:LiNbO₃ optical modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 2466~2475, 1993.
- [19] H. Miyamoto, H. Ohta, K. Tabuse, H. Iwaoka, and Y. Miyagawa, "A broad-band traveling-wave Ti:LiNbO₃ optical phase modulator," *Jpn. J Appl. Phys.*, vol. 30, no. 3A, pp. L383~L385, 1991.
- [20] 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)
- [21] K. C. Gupta et al., *Microstrip lines and Slotlines*, Artech House, pp. 257~301, 1979.
- [22] 김창민, 한상필, "Ti:LiNbO₃ 진행파 광변조기의 FEM 전극해석 및 대역폭 예측," *대한전자공학회 논문지*, 제32권, A편, 제2호, pp. 96~110, 1995
- [23] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [24] Jianming Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc, pp. 72~135, 1993.
- [25] C. H. Bulmer, W. K. Burns, and C. W. Pickett, "Linear 0-20 GHz modulation with a 1×2 directional coupler," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 28~30, Jan. 1991.

[26] R. C. Alferness, S. K. Korotky, and E. A. J. Marcatili, "Velocity-matching techniques for integrated optic traveling wave switch/

modulators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-20, no. 3, pp. 301~309, Feb. 1984.

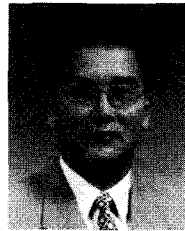
저 자 소 개



韓 榮 鐸(正會員)

1998년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 공학사. 2001년 2월 : 동 대학원 전자전기공학부 공학 석사. 현재 : 한국전자통신연구원 실리카 광부품팀 연구원. <주관심분야> 도파/집적광학, 광 스위치/변조기,

광통신시스템, FDM, FEM, BPM, SOR 등 수치해석, AWG 설계, 하이브리드 PLD 광모듈, FHD 공정, M/W Photonics



李 丙 權(正會員)

1977년 2월 : 한양대학교 금속공학과 공학사. 1982년 2월 : 동 대학원 금속공학과 금속공학석사. 1993년 2월 : 동 대학원 금속공학과 공학 박사. 현재 : 서울 정수기능대학교 교수 교학처장. <주관심분야> 금속재료, 열처리 표면개질, 광전재료, 수치해석

속재료, 열처리 표면개질, 광전재료, 수치해석



李 鬪 眞(正會員)

2000년 2월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 공학사. 현재 : 동 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정. <주관심분야> 광전자공학, 도파/집적광학, 광 스위치/변조기, 광통신 시스템, FDM, FEM, BPM, SOR, FDTD 등 수치해석, WKB이론, 반도체 공정

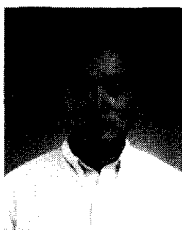
SOR, FDTD 등 수치해석, WKB이론, 반도체 공정



金 昌 敏(正會員)

1975년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사. 1982년 2월 : 동 대학원 전자공학과 공학 석사. 1989년 8월 : Univ. of Florida, Dept. of EE, Ph. D. 현재 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수. <주관심분야> 도파/집적광학, FDM, FEM, BPM, SOR 등 수치해석, 저분산 광섬유 설계, 진행파전극, 진행파전극/초고속광변조기, 저분산 광섬유, 광전송 시스템

도파/집적광학, FDM, FEM, BPM, SOR 등 수치해석, 저분산 광섬유 설계, 진행파전극, 진행파전극/초고속광변조기, 저분산 광섬유, 광전송 시스템



高 秉 國(正會員)

1997년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 공학사. 현재 : 동 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정. <주관심분야> 도파/집적광학, 광통신, 광 스위치/변조기, 광센서, FEM/FDM, SOR 등 수치해석, 반도체 공정

반도체 공정