

# 진행파형 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 위상 광변조기 설계 및 제작에 관한 연구

正會員 鄭 洪 植\* 正會員 徐 柁 河\*\* 正會員 儼 震 燮\*\*\*

## Study on the Design and Fabrication of Traveling-Wave Ti:LiNbO<sub>3</sub> Phase Optical Modulators

Hong-Sik Jung\*, Chung-Ha Suh\*\*, Jin-Seob Eom\*\*\* *Regular Members*

이 연구는 93년도 한국과학재단 핵심 전문 연구지원비에 의한 결과임  
\* 과제번호 931-0900-040-2

### 요 약

Ti:LiNbO<sub>3</sub> 채널형 광도파로와 Asymmetric Coplanar Strip(ACPS) 전극구조를 이용해서, 1.3 $\mu$ m에서 동작하는 진행파형 위상 광변조기를 설계, 제작한 다음 변조특성을 관찰하였다. 위상정합이 개선되도록 ACPS 진행파형 전극을 설계하기 위해서 전극과 완충막의 두께를 포함하여, 전극제원의 해석적 합수로 특성저항, 변조파의 유효굴절률 및 전극손실등을 고려하였다. Ti 확산방법으로 지순실 채널형 광도파로를 제작하였으며, double-spin image reversal 공정을 이용해서 2.5 $\mu$ m 두께의 전극을 형성하였다. 9GHz 부근에서의 전극구조 공진현상 때문에 변조특성이 제한 되었지만, 2.5GHz 까지는 큰 왜곡없이 변조특성이 관찰되었다.

### Abstract

Ti:LiNbO<sub>3</sub> traveling-wave phase optical modulators at wavelength 1.3 $\mu$ m have been designed and fabricated, focusing on the optical waveguide and asymmetric coplanar electrode structure. To improve the phase-mismatch of traveling-wave ACPS electrode, the characteristic impedance, effective microwave index, and electrode loss have been presented as a function of geometric parameters including electrode and buffer layer thickness. Low-loss channel optical waveguides on LiNbO<sub>3</sub> were fabricated by the Ti diffusion method with O<sub>2</sub> water-vapor environment. 2.5 $\mu$ m thick electrode was successfully fabricated by double-spin image reversal process. Modulation bandwidth was limited by a resonance at 2.9GHz and modulation bandwidth up to 2.5GHz was approximately measured.

\* 弘益大學校 電子電算工學科  
Dept. of Electronic and Computer Eng., Hong-Ik University

\*\* 弘益大學校 電子工學科  
Dept. of Electronic Eng., Hong-Ik University

\*\*\* 江原大學校 電子工學科  
Dept. of Electronic Eng., Kang-Won National University

論文番號: 94130

接受日字: 1994年 5月 13日

## I. 서 론

앞으로 전개될 사회는 정보화 시대로서, 고화질 TV, 영상회의, 동영상등과 같은 고속, 고화질 신호전송 서비스에 대한 수요가 급격히 증가되리라 예상된다. 이러한 수요에 능동적으로 대처하기 위해서는 고속, 대용량 전송시스템이 필요하며, 이에 하나로서 광통신 시스템에 대한 연구가 활발히 국내외적으로 진행되고 있다. 현재까지 개발된 저손실 광섬유, 고신뢰성 반도체 레이저, 그리고 광섬유 증폭기등의 출현은 광전송 기술을 기존의 타기술에 비하여 확고한 우위를 차지할 수 있게 하였으며, 이 기술은 차세대 고속 정보시스템의 중추기술로서 사용될 전망이다.[1]

광전송 시스템의 변조방법에는 반도체 레이저를 원하는 전송속도의 전기신호로 직접변조시키는 방식과, 변조신호를 외부형 광변조기를 통해서 인가시키는 간접변조 방식으로 구분된다. 전자의 변조방식을 이용할 경우, 고속변조시 나타나는 chirping, timing jitter, pattern effect와 같은 현상 때문에 전송용량과 시스템 성능이 제한 받게되며[2], 후자의 경우에는 전자와 같은 현상은 나타나지는 않지만, 추가적인 삽입손실 발생과 더불어 시스템이 복잡해진다. 그러나 대표적 전기광학 재료인 LiNbO<sub>3</sub>를 중심으로 20여년간 발전해온 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기는 제작공정, 소자의 성능 그리고 광섬유와의 접속등에 대한 현재의 기술상태를 고려해 볼때, 고속 전송시스템 구현에 있어서 핵심소자로 이용될 수 있다는 고무적인 연구 결과가 최근에 많이 발표되고 있으며, 실질적으로 이러한 소자들을 이용한 전송시스템들이 R&D 수준에서 많이 개발되고 있는 실정이다.[3] 따라서 본 논문에서는 채널형 광도파로와 ACPS(Asymmetric Coplanar Strip) 진행파형 전극구조를 이용한 진행파형 위상 광변조기의 설계 및 제작에 관해서 서술하였다.

효율적으로 동작하는 고속 광변조기를 구현하기 위해서는 광도파로와 진행파형 전극과 연관된 변수들의 상호관계 그리고 동작특성에 미치는 영향에 대해서 체계적인 검토가 요구된다. 특히 구동전력과 변조대역은 전극의 마이크로웨이브 특성으로부터 큰 영향을 받기 때문에 전극의 기하학적 제원 즉 전극의 폭, 간격, 두께 그리고 완충박막의 두께를 포함해서 전극의 특성임피던스와 손실등을 고려해야되며, 이와 더불어 광파와 변조파간의 위상속도 부정합, 광도파로에 대한 전극 배열 그리고 팩키지까지도 검토되

어야 한다. 따라서 이러한 취지에 부합되도록 본 논문을 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 위상형 광변조기의 동작원리를 이론적으로 검토하였으며, 3장에서는 진행파형 전극구조의 전기적 특성들을 해석적 함수로 유도해서, ACPS 전극구조를 설계하는데에 이용하였다. 위상속도 부정합, 전극손실 그리고 광도파로에 대한 전극의 배열등을 포함하여 변조대역 및 동작전력을 검토한 다음 광변조기의 최적화 과정을 4장에서 언급하였으며, 5장에서는 제작공정과 측정된 전기적 특성들을 검토한 다음, 결론을 실었다.

## II. 위상 광변조기의 동작원리

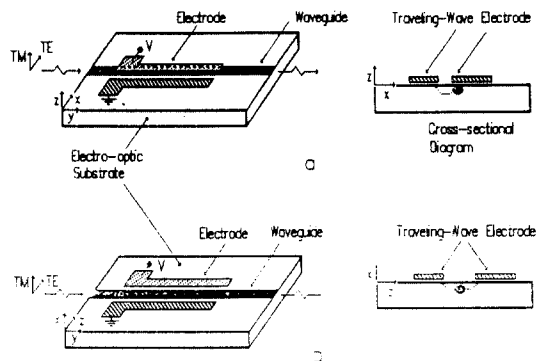


그림 1. 진행파형 위상 광변조기 구조.

(a) X(or Y)-cut LiNbO<sub>3</sub>, (b) Z-cut LiNbO<sub>3</sub>

채널형 단일모드 광도파로와 평판형(coplanar) 전극구조로 구성되는 진행파형 위상 광변조기는 그림 1과 같으며, 기판의 절편(cut)에 따라 도파로 위 또는 옆쪽으로 전극이 배열된다. 그림 1-(a)는 전기장이 도파로를 수직방향으로 통과되도록 배열한 구조이며, 그림 1-(b)는 수평방향으로 통과되도록 배열한 것이다. 이와같이 광도파로에 대한 전극의 위치는 기판의 절편, 결정축에 대한 도파로의 위치, 그리고 전기광학계수 분포등을 고려하여 결정된다. 변조신호가 전극에 인가되어 형성된 전기장의 일부가 도파로를 관통하면, 전기광학효과에 의해서 도파로의 굴절률이 변하게 되어, 궁극적으로는 도파로를 진행하는 광파의 위상을 변화시키게 된다.

Z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판을 이용할 경우, 그림 1-(a)와 같이 전극을 도파로 위에 배열시켜, 전기광학계수중

가장 큰 값을 가지고 있는  $r_{33}$  계수를 이용한다. 이 경우와 같이 전극이 도파로 위에 놓이게 되면 광파가 전극에 의해 흡수되어 큰 손실이 일어나기 때문에, 전극과 도파로 사이에 얇은 유전체 박막을 삽입시켜 광파의 흡수를 막는다. 한편 도파로를 진행하는 광파의 편광 형태는 TM 모드가 되어야만 전기광학으로 변화된 굴절률을 효과적으로 이용할 수 있다. 전기광학적으로 변화된 굴절률은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{n}_z = \mathbf{n}_e + \Delta \mathbf{n}_e = \mathbf{n}_z - \frac{1}{2} (\mathbf{n}_e^3 \mathbf{r}_{33} \mathbf{E}_z) \quad (1)$$

여기서  $E_z$ 는 도파로를 통과하는 전기장의 세기이며,  $n_e$ 는  $\text{LiNbO}_3$ 의 이방성 굴절률이다. Y-cut (또는 X cut)  $\text{LiNbO}_3$  기판을 이용할 경우에는, 그림 1-(b)와 같이 전극을 도파로 양쪽에 배열시켜, 결정축 방향으로 존재하는  $r_{33}$  전기광학계수를 이용한다. 이때 광파의 편광은 TE 모드가 되어야 한다. 이 경우에는 전극과 도파로가 직접 접촉되지 않기 때문에 유전체 박막은 필요치 않으나, 특수한 경우에는 필요에 따라 사용할 수 있다. 변화된 도파로의 굴절률은 식(1)과 동일하다.

이방성굴절률(extraordinary index),  $n_e$ 의 변화량은 인가전압에 대해서 선형적으로 비례하며, 다음과 같다.

$$\Delta n_e = -\frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{n}_e^3 \cdot \mathbf{r}_{33} \cdot \mathbf{V}}{S} \right) \cdot \Gamma \quad (2)$$

여기서 S는 전극의 간격, 중복상수라 일컫는  $\Gamma$ 는 전기장과 광파가 서로 겹치는 정도를 나타내는 척도이며, 이와 같은 변조기 구조에서는 광도파로에 대한 전극의 상대적인 위치에 따라 0.25-0.4 정도의 값을 갖는다. 광파의 파장  $\lambda$ 에 대해서 굴절률 변화량,  $\Delta n_e$ 에 대한 전파상수(propagation constant) 변화량,  $\Delta \beta$ 와의 관계는 다음과 같으며,

$$\Delta \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_e \quad (3)$$

이에 대응되는 위상변화량,  $\Delta \phi$ 는 전극길이가  $l$ 일 경우 아래와 같다.

$$\Delta \phi = \Delta \beta \cdot l = -\frac{\pi \cdot \mathbf{n}_e^3 \cdot \mathbf{r}_{33} \cdot \mathbf{V}}{\lambda \cdot S} \cdot \Gamma \quad (4)$$

따라서 180° 위상변화에 필요한 동작전압,  $V_\pi$ 는 식(4)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$V_\pi = \frac{\lambda \cdot S}{\mathbf{n}_e^3 \cdot \mathbf{r}_{33} \cdot \Gamma} \quad (5)$$

변조신호,  $E_m \sin \omega_m t$ 를 전극에 인가할 경우, 광도파로에 입사된 광파,  $e_{in} = A \cos \omega t$ 는 다음과 같은 형태로 변조되어 출력된다.

$$e_{out} = A \cdot \cos[\omega t - \delta \cdot \sin \omega_m t] \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\lambda \mathbf{n}_e^3 \mathbf{r}_{33} \mathbf{V} \cdot l}{\lambda \cdot S}$$

여기서  $\delta$ 는 위상변조 지수(phase modulation index)라 일컫으며, Bessel 함수 전개식을 이용하면, 식(6)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_{out} = A \cdot [J_0(\delta) \cos \omega t + J_1(\delta) \cos(\omega + \omega_m)t + J_1(\delta) \cos(\omega - \omega_m)t + J_2(\delta) \cos(\omega + 2\omega_m)t \quad (7)$$

식(7)은 변조지수  $\delta$ 의 함수로 스펙트럼상에서 여러 성분포를 의미한다.  $\delta = 0$ 일 경우 즉 변조신호가 인가되지 않을 경우 기본모드  $J_0$ 만 나타나고, 변조신호가 증가됨에 따라  $J_0$ 는 점점 약해지며, 상대적으로 고조파  $J_1$  모드들이 점점 강해지게 된다.  $\pi$  만큼 위상변화에 필요한 전압  $V_\pi$ 가 인가되면 기본모드  $J_0$ 는 없어지며, 이 현상으로부터  $V_\pi$  전압을 간접적으로 측정할 수 있다.[4]

### III. 진행파형 전극구조의 설계

#### 1. 진행파형 전극구조의 해석적 고찰

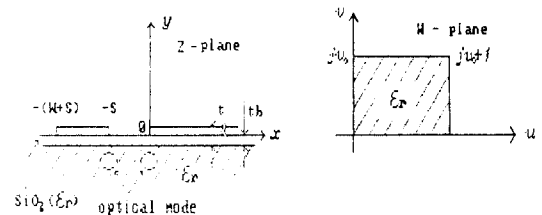


그림 2. 진행파형 전극구조 및 대응되는 conformal mapping 변환

일반적으로 진행과정 광변조기의 구동전력 및 변조 대역은 전극의 마이크로파 특성에 의존되기 때문에, 전극설계시 특성저항, 변조파의 유효굴절률 및 감쇠 등을 고려하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 RF 변조파가 TEM 모드라는 가정하에, Schwartz-Christoffel 변환방법을 이용해서, 전극의 마이크로파 특성을 전극과 완충박막의 두께를 포함한 전극제원의 해석 함수로 나타내었다. ACPS 전극구조와 이에 대응되는 conformal mapping은 그림 2와 같으며, 일반적으로 TEM형 전송선로의 특성저항  $Z_C$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_C = \frac{1}{V_m \cdot C_C} = \frac{1}{c \sqrt{C_0 \cdot C_C}} \quad (8)$$

여기서  $c$ 는 빛의 속도,  $C_C$ ,  $C_0$ 는 유전체 및 자유공간에서 단위길이당 전송선로의 정전용량이며, 식 (8)로부터 변조파 위상속도,  $V_m$ 은 다음과 같이 유도된다.

$$\left(\frac{c}{V_m}\right)^2 = \frac{C_C}{C_0} = \epsilon_{eff} \quad (9)$$

이러한 변조파의 유효 비유전율,  $\epsilon_{eff}$ 와 굴절률,  $n_{eff}$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$n_{eff} = \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (10)$$

정전용량  $C_C$ ,  $C_0$ 는 conformal mapping 방법으로 유도될 수 있으며, 그림 2의 ACPS 전극구조의 mapping 함수는 아래와 같다.

$$W(z) = A \int_0^z \frac{dz}{[z(z+S)(z+W+S)]^{1/2}} + B \quad (11)$$

여기서  $z$ 는  $W$ -plane에서 임의의 점을 나타내며,  $A$ ,  $B$ 는 임의의 상수이다. Complete Elliptical Integral  $K(k) = \text{sn}^{-1}(1, k)$ 와 complementary  $K'(k)$ 을 이용하여  $W$ -plane에서의  $v_0$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$v_0 = K(k) / K'(k) \quad (12)$$

여기서  $k$ ,  $k'$ 는 전극제원의 Aspect Ratio로서 다음과 같이 정의 된다.

$$k = \left[\frac{S}{W+S}\right]^{1/2}, k' = (1-k^2)^{1/2} \quad (13)$$

이 전극구조의 유전체 및 자유공간에서 단위길이당 정전용량,  $C_C$  및  $C_0$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$C_C = \frac{\epsilon_0(\epsilon_r + 1)}{v_0} = \epsilon_0(1 + \epsilon_r) \cdot \frac{K'(k)}{K(k)} \quad (14-1)$$

$$C_0 = 2 \frac{\epsilon_0}{v_0} = 2 \epsilon_0 \cdot \frac{K'(k)}{K(k)} \quad (14-2)$$

식 (9)와 (14)로부터, 진행과정 전극의 유효 비유전율  $\epsilon_{eff}$ 는 다음과 같이 유도되며,

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (15)$$

이방성 결정인 LiNbO<sub>3</sub> 경우에는  $\epsilon_{11} = 28$ ,  $\epsilon_{33} = 44$ 이며,  $\epsilon_r = (\epsilon_{11} \cdot \epsilon_{33})^{1/2}$ 로 정의된다. 단  $z$ -방향으로 진행되는 소자에 대해서는 예외이다.

지금까지 논의된 내용은 전극의 두께와 완충박막의 효과를 포함시키지 않고 고려된 것이다. 그러나 전극고속에 의한 광파의 흡수를 막기 위해서 SiO<sub>2</sub> 또는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같은 유전체를 완충박막으로, 위상정합과 전극손실을 줄이기 위해서 두꺼운 전극을 사용할 경우, 전자로부터 기인되는 용량  $C_b$ 와 후자로부터 기인되는 용량  $C_t$ 를 고려하면  $C_C$ 와  $C_0$ 를 다음과 같이 수정되어진다. 즉 그림 3의 등가모델과 같이 기생용량  $C_t$ 는 전극의 정전용량을 증가시키며,  $C_b$ 는 LiNbO<sub>3</sub>보다 작은 완충박막의 비유전율 값 때문에 전극의 정전용량을 감소시키므로 식 (14)는 아래와 같이 수정된다.

$$C_C = \epsilon_0(1 + \epsilon_r) \cdot \frac{K'(k)}{K(k)} + C_t - C_b \quad (16-1)$$

$$C_0 = 2 \epsilon_0 \cdot \frac{K'(k)}{K(k)} + C_t \quad (16-2)$$

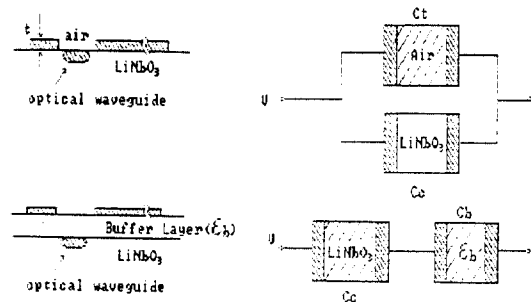


그림 3. 진행과정 전극구조의 정전용량 등가모델

$C_1$ 는 평행평판형 커패시턴스 구조로 고려해서 conformal mapping 방법으로 유도된 식을 사용하였으며,  $C_b$ 는 Green 함수방법으로 부터 유추해낸 다음과 같은 해석적 표현을 이용하였다.[5]

$$C_1 = \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{a_1 - a_2 \cdot \ln(W/S) + a_3 \cdot \ln(a_4 + t/S)}{\ln(4 \cdot S/t) + 1/8 \cdot (t/S)^2} \quad (17)$$

$$a_1 = 0.56677, a_2 = 0.03834, a_3 = 0.22411, a_4 = 0.08893$$

$$C_b = b_1 \cdot \epsilon_b \cdot \epsilon_0 \cdot \ln(1 + b_2 \cdot k) \cdot \ln(b_3 + b_4 \cdot t_b/S) \quad (18)$$

$$b_1 = 1.341, b_2 = 10.477, b_3 = 1.0658, b_4 = 34.9426$$

$t_b = 0$  즉 완충박막이 없을 경우, 전극제원의 비  $W/S$ 와  $t/S$ 의 함수로 계산된 유효굴절률과 특성저항은 그림 4와 같다. 예상대로 전극의 두께가 증가함에 따라 변조파의 유효굴절률이 감소하며, 이에 대응해서 특성저항도 감소됨을 알 수 있다. 특히  $W/S$ 의 비가 작을수록 전극두께의 효과가 두드러짐을 알 수 있다. 즉 전극의 두께는 전기장 분포를 변화시켜, 자유공간으로 분포되는 전기장이 전극두께와 함께 증가되어서 변조파의 유효 비유전율을 감소시키게 된다.

작은 비유전율 값을 갖는 유전체를 완충박막으로 사용하는 목적은 세가지로 요약될 수 있다. 첫째는 전극에 의해서 광파가 흡수되는 것을 막고, 둘째는 전극손실을 감소시킬 수 있으며, 셋째는 변조파의 전기

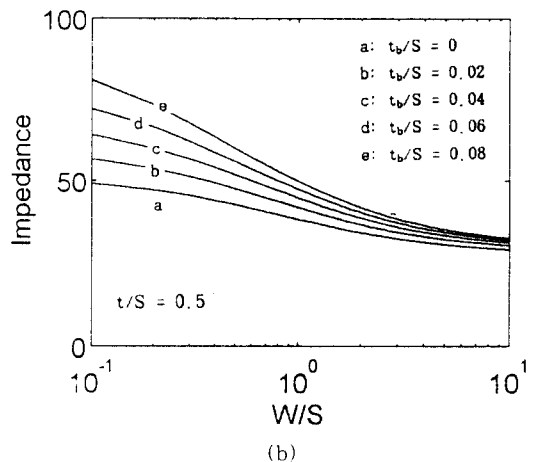
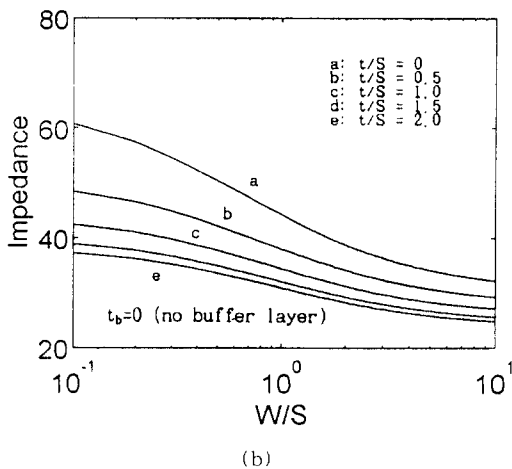
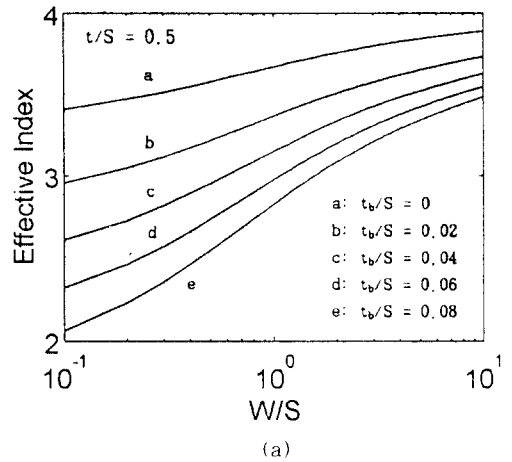
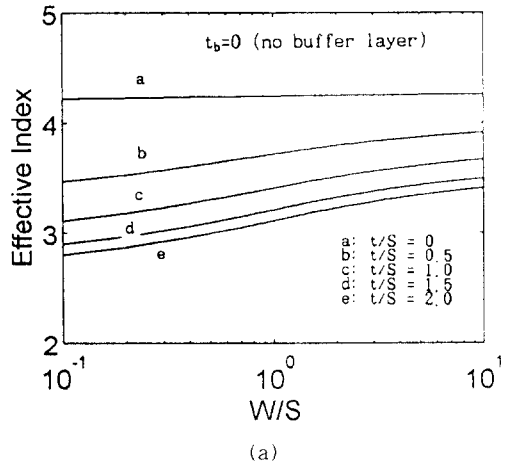


그림 4. ACPS에 대한  $W/S$ 와  $t/S$ 의 함수로 계산된 (a) 유효굴절률과 (b) 특성저항

그림 5. ACPS에 대한  $W/S$ 와  $t/S$ 의 함수로 계산된 (a) 유효굴절률과 (b) 특성저항

장 일부가 완충박막으로 진행함에 따라 변조과의 유효굴절률이 감소되어 위상정합을 향상시킬 수가 있다. 그림 5는 전극두께가  $t/S = 0.5$ 인 경우에 대해서  $W/S$ 와  $t_b/S$ 의 함수로 유도된 유효굴절률과 특성저항을 보여주고 있으며 세번째 목적에 부합됨을 알 수 있다. 완충박막이 두꺼울수록 유효굴절률은 감소하며, 이와 반대로 특성저항은 증가함을 알 수 있다. 따라서 전극과 완충박막의 두께를 적절히 이용하면 특성저항을 크게 변화시키지 않으면서, 변조과의 유효굴절률을 감소시켜, 위상속도 차를 줄이면서 변조대역을 증가시킬 수 있다. 그러나 전극두께와 완충박막이 위상정합에 미치는 영향은 아주 다르다. 전극두께는 구동전력을 증가시키지 않으면서 변조대역을 증가시킬 수 있으나, 이와 대조적으로 완충박막은 위상정합을 개선시켜 변조대역을 증가시키지만, 전기장의 세기가 감소되어 구동전력이 또한 증가된다. 따라서 변조대역을 증가시키기 위해서 완충박막을 이용할 경우 전력소모의 증가는 감수해야 된다.

2. 전계분포와 OVERLAP FACTOR

전기광학 집적소자의 동작원리는 광도파로를 지나는 광파와 전계와의 상호작용에 기인되기 때문에, 전극의 전계분포와 Overlap Factor,  $\Gamma$ 의 정확한 계산은 소자를 최적화 시키는데 매우 중요하다. 특히 Overlap Factor는 변조과 전계와 광도파로를 진행하는 광파간에 겹치는 정도를 나타내며, 식 (5)에 나타난 바와 같이 구동전력에 많은 영향을 미친다. 진행과정 전극 구조의 전계분포는 Laplace 방정식과 conformal mapping 함수로부터 유도될 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.[6]

$$E_x = \frac{V_0}{|\nu_0|} \cdot \text{Re}\left(\frac{dW}{dz}\right) = \frac{V_0}{2 \cdot \mathbf{K}(k)} \cdot \text{Re}\left(\frac{dW}{dz}\right) \quad (19-1)$$

$$E_y = \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}\right)^{1/2} \cdot \frac{V_0}{|\nu_0|} \cdot \text{Im}\left(\frac{dW}{dz}\right) \\ = \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}\right)^{1/2} \cdot \frac{V_0}{2 \cdot \mathbf{K}(k)} \cdot \text{Im}\left(\frac{dW}{dz}\right) \quad (19-2)$$

여기서 Re, Im는 실수와 허수를 의미한다. 광도파로의 깊이를  $y$ , 전극제원을  $x$ 의 함수로 할 경우  $W = 20\mu\text{m}$ ,  $S = 8\mu\text{m}$  제원을 갖는 전극구조의 전계분포는 그림 6과 같다. 한편, Overlap factor는 다음과 같이 정의된다.

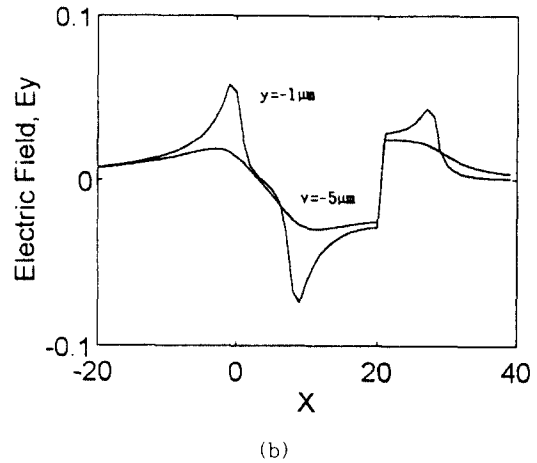
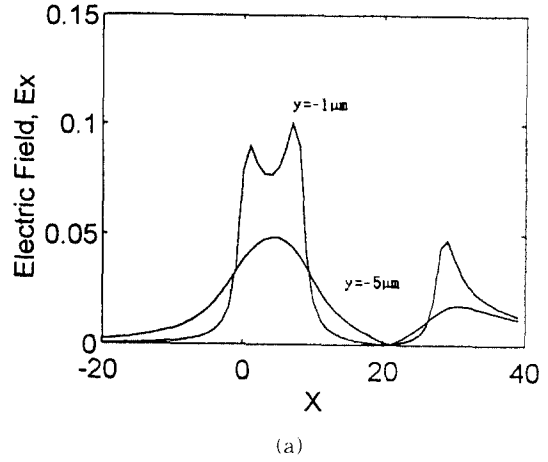


그림 6. Y:LiNbO<sub>3</sub>에 제작된 ACPS 전극의 전계분포 (a) Ex (b) Ey : S = 20μm, W = 8μm,  $\epsilon_x = 43$ ,  $\epsilon_y = 28$

$$\Gamma = \frac{S}{V_0} \cdot \frac{\iint E_{op}^2(x, y) \cdot E_d(x, y) dx dy}{\iint E_{op}^2(x, y) dx dy} \quad (20)$$

여기서  $E_{op}(x, y)$ 는 광도파로를 진행하는 광파의 profile이며  $E_d(x, y)$ 는 인가된 변조과의 전계이다. 한편 S는 전극의 간격이며,  $V_0$ 는 인가전압이다. 따라서  $\Gamma$ 를 정확히 계산하기 위해서  $E_{op}(x, y)$ 에 대한 정확한 계산이 선행되어야 한다. 다양한 방법으로  $E_{op}$ 가 유도되어질 수 있으나, 본 연구에서는 Hermite-Gaussian 함수에 의한 다음과 같은 근사식을 이용하였다.[6]

$$E_{ov}^2(x, y) = \frac{4y^2}{w_x \cdot w_y^3 \cdot \pi} \cdot \exp[-(\frac{x-p}{w_x})^2] \cdot \exp[-(\frac{y}{w_y})^2] \quad (21)$$

여기서 p는 광파의 최대치를 표시하는 위치이며,  $w_x$ ,  $w_y$ 는 광파의 세기가 1/e이 되는 위치를 나타내며, 이 값은 광도파로의 확산공정 조건에 따라 많은 영향을 받는다. 식 (21)을 (20)에 대입하여,  $\Gamma$ 를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{S}{\Gamma_0} \cdot \frac{4}{w_x \cdot w_y^3 \cdot \pi} \cdot \iint y^2 \cdot \exp[-(\frac{x-p}{w_x})^2] \cdot \exp[-(\frac{y}{w_y})^2] \cdot E_{el}(x, y) dx dy \quad (22)$$

$E_{el}(x, y)$ 는 식 (19)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{el}(x, y) = \left| \frac{K'(k)}{K(k)} \right| \cdot \sqrt{[R\{w(x, y)\}]^2 + (\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_{33}}) \cdot [L_m\{w(x, y)\}]^2} \quad (23)$$

여기서  $w(x, y)$ 는 ACPS 구조에 대한 conformal mapping 함수이며 앞서 언급된 식 (11)과 같다. 따라서 위의 식들을 이용하여  $\Gamma$ 가 최대값을 갖도록 전극을 설계해서 광변조기를 제작할 경우 구동전력을 최소화 시킬 수 있다.  $W=20\mu\text{m}$ ,  $S=8\mu\text{m}$  갖는 전

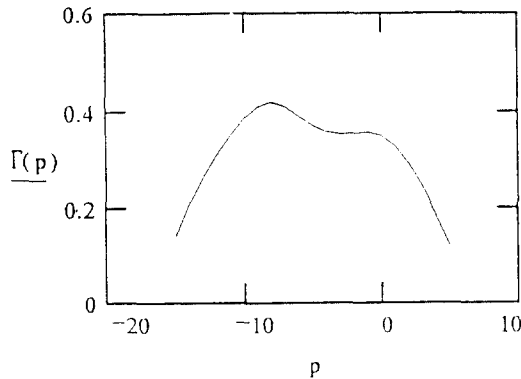


그림 7. 광도파로와 ACPS 전극의 상대적인 위치에 따른 Overlap Factor의 변화  $w_x = 2.5\mu\text{m}$ ,  $w_y = 2.0\mu\text{m}$

극에  $w_x = 2.5\mu\text{m}$ ,  $w_y = 2.0\mu\text{m}$ 의 특성을 갖는 광파를 적용해서  $\Gamma$ 를 계산한 결과 광파가 전극 가운데 위치할 경우 0.35 정도의 값이 계산되었다. 그림 7은 y-LiNbO<sub>3</sub>에 ACPS 전극구조를 이용했을 경우 광도파로(즉 광파)의 위치에 따른 Overlap Factor의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 Z-LiNbO<sub>3</sub>를 이용할 경우  $\Gamma$ 값은 전극의 안쪽 가장자리에 확산전 Ti 패턴의 안쪽 가장자리와 일치하도록 배열할때 가장 큰 값을 갖고며, 한편 y-LiNbO<sub>3</sub>를 이용할 경우에는 광도파로가 전극의 중앙에 위치하도록 배열하면 최적화된  $\Gamma$ 값을 얻을 수 있다.

#### IV. 변조대역 및 구동전력

진행파형 광변조기의 변조대역과 구동전력은 전극 손실, 위상속도 부정합, 전극길이 등에 크게 좌우된다는 것을 2장에서 이미 언급하였다. 이 중에서도 도파로를 진행하는 광파와 전극을 따라 진행하는 변조파들간의 위상속도차가 매우 큰 영향을 미친다. 이 현상을 전환시간(transit time) 또는 walk-off 현상이라 일컫는다.

먼저 진행파형 전극의 특성지향각이 rf 전원의 특성지향각과 종단지향각으로 정합되어 있다고 가정한다. 전극에 인가되는 sinusoidal 변조파 신호는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Gamma(z, t) = \Gamma \cdot \sin(-\frac{2\pi n_m}{\lambda_m} \cdot z - 2\pi f t) \quad (24)$$

여기서  $n_m$ ,  $\lambda_m$ ,  $f$ 는 변조파의 유효굴절률, 파장, 주파수를 의미한다. 여기서  $z$ 는 결정축을 의미하는 것이 아니라, 변조파가 진행하는 방향에서의 임의의 위치를 나타낸다.  $t = t_0$ 인 시간에 입사된 광자(photon)가 도파로를 따라 진행하는 동안 대응되는 변조파 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[7]

$$\Gamma(z, t_0) = \Gamma \cdot \sin(-\frac{2\pi n_m \cdot f}{c} (1 - \frac{n_0}{n_m}) \cdot z - 2\pi f t_0) \quad (25)$$

여기서  $n_0$ 는 광파의 유효굴절률이 된다. 대부분의 광변조기는 전기광학적으로 축적된 위상 변화량에 의해서 변조가 이루어진다. 따라서 전환시간은 변조속도 즉 변조주파수 증가에 따라 위상변화의 축적을 감소시키게 되며, 이러한 현상을 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_0^L \Delta\beta(f) \cdot dZ = \Delta\beta_0 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot T_w \cdot f)}{\pi \cdot T_w \cdot f} \cdot \sin[\pi \cdot (2t_0 - T_w) \cdot f] \quad (26)$$

$$\Delta\beta_0 = \pi \cdot n_c^3 \cdot r_{33} \cdot \Gamma \cdot V \cdot L / \lambda \cdot d$$

$$T_w = \frac{L}{c} \cdot (n_m - n_0)$$

위식에서  $\Delta\beta_0$ 는 DC 위상 변화량이며,  $T_w$ 는 광파와 변조파간의 위상 속도차를 나타낸다.  $n_0 = n_m$ 이면 광파와 변조파는 같은 속도로 진행되며, 궁극적으로 광파는 전 전극에 걸쳐서 균일하게 위상변화를 축적할 수 있게 된다. 즉  $\Delta\beta$ 는  $V \cdot L$ 항에 직접 비례하게 되며, 전극길이를 주파수 특성과 관계없이 임의대로 결정하여, 필요한  $V_\pi$  전압을 낮출 수가 있다. 한편  $n_0 \neq n_m$  일 경우, 광파와 변조파의 위상속도가 달라지고, 전환시간 현상이 나타나게 되어, 효과적으로 위상변화를 축적할 수 없게 된다. 매우 큰 주파수 또는 전극길이에서는  $\Delta\beta$ 가 완전히 소멸된다.

지금까지 주파수 특성에 전환시간 효과만 고려하였지만, 전극손실 또한 주파수 특성에 큰 영향을 미친다. 이것을 포함시켜 광변조기의 변조대역 특성을 다음과 같이 나타낼 수 있다.[8]

$$H(f) = e^{-(\alpha \cdot L / z)} \cdot \left[ \frac{\sinh^2(\frac{\alpha L}{2}) + \sin^2(\frac{\xi L}{2})}{(\frac{\alpha L}{2})^2 + (\frac{\xi L}{2})^2} \right]^{1/2} \quad (27)$$

$$\xi = 2\pi f(n_m - n_0) / c$$

그림 8은 변조파의 유효굴절률, 전극손실 및 전극길이에 따른 주파수 특성을 보여주고 있으며, 이는 앞서 언급된 내용을 뒷받침해주고 있다. 변조파의 유효굴절률이 광파의 유효굴절률로 근접될수록, 전극손실이 적을수록, 전극길이가 짧을수록 변조대역이 증가하는 것을 알 수 있다.

진행파형 위상 광변조기에 필요한 구동전력을 그림 9와 같은 등가모델을 통해서 고려하였다.  $Z_0$ 는 변조파 전원의 특성 임피던스이며, 종단저항은 진행파형 전극의 임피던스  $Z$ 와 정합되어 있다고 가정한다. 이때 위상 변화량  $\Delta\phi(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

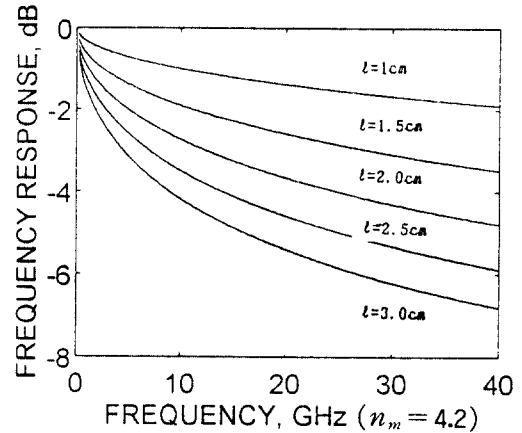
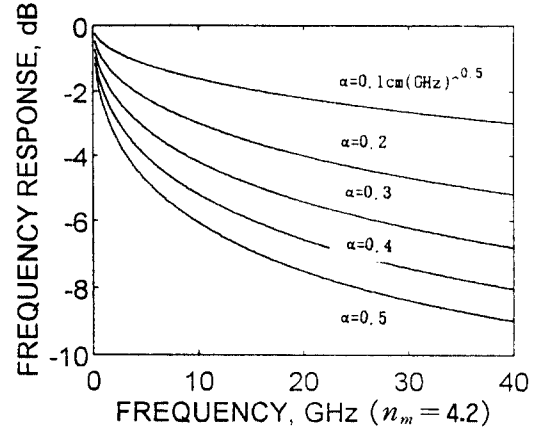


그림 8. 변조파의 유효굴절률에 따른 주파수 특성( $L = 1\text{cm}$ ,  $\alpha = 0$ )

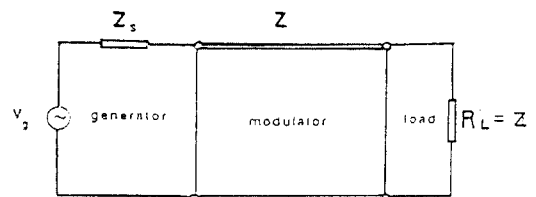


그림 9. 진행파형 광변조기의 등가모델



$$\Delta\phi(t) = \frac{Z}{Z_s + Z} \cdot V_m \cos(2\pi ft) L \cdot k \cdot \Gamma \cdot H(f) \quad (28)$$

여기서  $V_m$ 는 마이크로웨이브 변조파 세기이며,  $k = (\pi/\lambda)r_{33}n_e^3$ 이다. 이때, 주파수  $f$ 에서 광변조기에 필요한 구동전력,  $p(f)$ 는 다음과 같으며,

$$P(f) = \frac{1}{8} [V_m(f)]^2/Z, \quad (29)$$

식 (28), (29)와  $\Delta\phi(t) = \pi$ 인 이용해서  $V_m(f)$ 를 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_m(f) = \frac{\pi(Z + Z_s)}{Z \cdot L \cdot k \cdot \Gamma \cdot H(f)} = \frac{(Z + Z_s)V_\pi}{Z \cdot H(f)} \quad (30)$$

여기서  $V_\pi$ 는 DC 스위칭 전압을 의미하며,  $V_\pi = \pi/Lk\Gamma$ 이다. 이에 필요한 구동전력  $P(f)$ 는 궁극적으로 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.[9]

$$P(f) = \left[ \frac{\pi \cdot (Z + Z_s)}{Z \cdot L \cdot k \cdot \Gamma \cdot H(f)} \right]^2 / 8 \cdot Z, \quad (31)$$

### V. 제작공정 및 변조실험

1.3 $\mu$ m 파장에서 동작하는 진행파형 위상 광변조기를 구현하기 위해서 채널형 광도파로와 ACPS 전극 Mask를 제작하였다. 단일모드 광도파로를 제작하기 위해서 도파로 폭을 6-7 $\mu$ m 중심으로 설계하였으며, 전극구조의 제원과 이에 따른 마이크로웨이브 특성을 표 1에 요약하였다.

y-cut LiNbO<sub>3</sub>에 lift-off 공정을 이용해서 600-700Å 두께의 채널형 Ti 패턴을 형성한 다음, 1025°C 고온에서 7시간 동안 확산시키며, Ti이 확산해 들어간 부분의 굴절률이 약간 증가되어 도파로를 형성하게 된다. 한편 확산과정에서 고온처리에 따른 Li의 out-diffusion이 일어나서, 기생(parasite) 평면 광도파로를 형성하게 되어 변조기의 특성을 악화시키기 때문에 out-diffusion 현상을 억제하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 Li의 out-diffusion을 막기 위하여 water vapor 방법을 이용하였다.[10] 확산이 일어나는 동안, 외부에서 약 50°C 정도로 가열된 종류수에 통과시킨 O<sub>2</sub> 가스를 확산로 내부로 주입시키면, Li의 out-diffusion을 효과적으로 억제시킬 수 있게 된다. 본 연구에서는 완벽하게 out-diffusion을 억제하지 못하였지만, 위에 제시된 방법을 이용해서 out-diffusion을 상당히 억제시킬 수 있었다. 확산공정 조건들을 표 2에 요약하였다. Ti 확산으로 제작된 광도파로에 레이저를 입사시키기 위해서 광도파로의 단면을 optical-grade로 연마하였다.

표 2. 채널 광도파로의 제작공정 조건( $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ )

공정조건	구 격
Ti 두께	670 Å
Ti 폭	7.2 $\mu\text{m}$
확산온도	1025°C
확산시간	7 hrs
주입가스	O <sub>2</sub>
가스압력	19.7scm

위상형 광변조기의 진행파형 전극구조를 double-spin image reversal 공정을 이용해서 제작하였다. 이 공정의 특징은 식각(etching) 공정없이 약 2.5-3 $\mu$ m 두께의 전극 패턴을 제작할 수 있다는 것이다. AZ 5214 감광액과 negative photomask를 이용하여 마스크와 반대되는 패턴을 lift-off 공정으로 제작하는 것이다. 전극 제작시 광도파로에 대한 전극의 배열(alignment)이 매우 중요하지만, 도파로 위에 증착된 유전체 박막과 두꺼운 전극 때문에, 전극을 정교하게 배열하는 것은 여간 어렵지 않다. 이러한 상황에서 positive mask를 이용해서 lift-off 패턴을 제작하는 것은 매우 어렵기 때문에, 위와 같은 공정을 이용하였다. 이렇게 제작된 패턴위에 Ti/Cu/Ti/Au와 같은 다층구조의 금

표 1. ACPS 진행파형 전극구조의 세원 및 마이크로웨이브 특성

전극 구조	기판의 절연	Width ( $\mu\text{m}$ )	Gap ( $\mu\text{m}$ )	Te ( $\mu\text{m}$ )	Tb ( $\mu\text{m}$ )	Ts ( $\mu\text{m}$ )	$\ell$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Gamma$	$n_m$	Zs ( $\Omega$ )
ACPS	y	20	7	2.5	0.5	500	0.6	0.35	3.27	39
ACPS	y	20	8	2.5	0.5	500	0.6	0.35	3.27	40

속 박막을 multi-pocket e-beam 장치를 이용해서 증착한 다음, acetone 속에 놓아두면 감광액 위의 금속은 lift-off 되어 ACPS 전극구조를 제작할 수 있었다. 위상속도 부정합을 개선시키기 위해서, 500Å 두께의 SiO<sub>2</sub>를 RF-sputtering 장치를 이용해서 증착하였다.

RF 변조신호를 인가시키기 위하여, 황동(brass)를 이용해서 그림 10과 같은 fixture를 제작하였다. SMA connector를 전극의 접촉패드에 직접 연결될 수 있도록 fixture를 설계하였으며, 집지 전극위에 황동블럭을 올려놓아, 변조파의 유효굴절률 감소를 시도하였으며, network analyzer를 이용하여 전극의 전기적 특성을 검토하였다. S<sub>21</sub> 파라미터를 측정된 결과 그림 10과 같이 약 10GHz까지의 큰 무리없는 주파수 특성이 관찰되었으나, 2.9GHz 부근에서 공진 현상이 발생되었다. 이 현상에 관한 원인은 명확하게 파악되지 않고 있으나, 특성저항의 부정합 및 fixture 구조의 공진성 때문에 기인되지 않나 사료된다.

제작된 광도파로와 레이저를 결합시키기 위해서 end-fire 결합시스템을 구성하였다. X-Y-Z optical stage를 사용해서, 입력단과 출력단에 40X 대물렌즈(objective lens)를 장착하여 광도파로 단면에 초점을 맞출 수 있도록 구성하였다. LaserMax사의 1.3μm InGaAsP 반도체 레이저를 광원으로 사용하였다. 반도체 레이저에서 나오는 모드에서, 실험에 필요한 이방성

모드(extraordinary mode)를 선택하기 위하여 polarized beam splitter를 사용하였으며, 이렇게 선택된 편파를 또 다른 직교 편파로 바꾸기 위해서 half-wave plate를 이용하여 편파를 변경할 수 있도록 구성하였다.

HP83620A synthesized sweeper를 이용하여 변조신호를 인가하였으며, 잡음을 줄이기 위해서 PIN 고속검파기를 이용하여 변조된 광신호를 전기신호로 바꾸었다. 이때 약해진 출력파워를 마이크로웨이브 증폭기를 이용해서 보상하였다. 변조신호의 주파수를 변경시키면서, HP8592D 스펙트럼 분석기로 각 변조 주파수에 대응된 스펙트럼의 세기를 상대적으로 측정, 비교해서 변조대역을 측정하였다. 연속적인 공정 과정으로 인해 측정에 사용된 소자들의 삽입손실이 예상보다 많이 증가된 관계로 스펙트럼의 파워 세기를 정확하게 측정하는데 많은 어려움을 겪었다. 측정된 Optical 3dB 변조대역은 2.5GHz였으며, 이론적 계산치보다 낮게 측정됨을 전극의 공진현상과 증가된 삽입손실에 기인된 것으로 사료된다.

## VI. 결 론

Ti:LiNbO<sub>3</sub> 채널형 광도파로와 ACPS 진행파형 전극구조를 이용해서 1.3μm에서 동작하는 진행파형 위상 광변조기를 설계, 제작하였다. ACPS 전극구조에 대한 전기적 특성 즉 특성저항, 변조파의 유효굴절률 그리고 전극손실등을 전극과 완충박막의 두께를 포함시킨 전극제원의 해석적 함수로 고려해서 계산하였다. Ti 확산방법을 이용해서 채널형 광도파로를 제작하였으며, double-spin image reversal 공정을 이용해서 2.5μm 두께의 진행파형 전극을 제작하였다. 2.9GHz 부근에서 예상치 못한 공진현상 때문에 변조대역이 제한 되었으나, 2.5GHz까지는 변조특성을 관찰할 수 있었다. 현재 광도파로의 삽입손실을 줄이기 위해서 도파로 제작공정의 최적화와 더불어, 공진현상을 없애기 위해 CPW(coplanar waveguide) 전극구조를 이용하려고 계획하고 있으며, 백키지도 다시 고안할 예정이다.

## 참 고 문 헌

1. C. Rolland, L. E. Tarof, and A. Somani, "Multigigabit networks: The challenge," IEEE Lightwave Telecommunication Systems, pp.

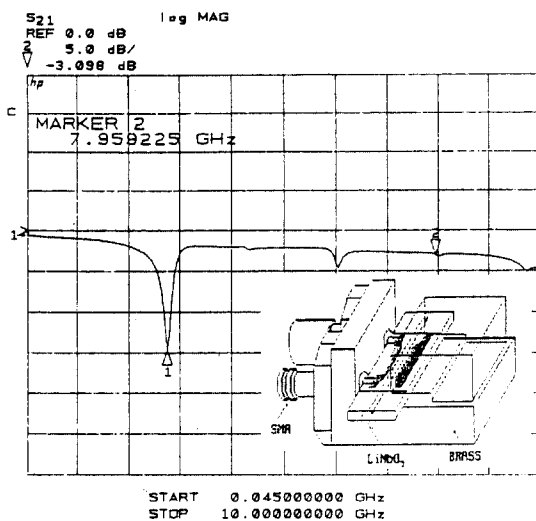


그림 10. Network Analyzer로 측정된 ACPS 전극의 S<sub>21</sub> 파라미터

16-26, May 1992.

2. G. P. Agrawal, T. M. Shen, "power penalty due to decision-time jitter in optical communication systems," Electronic. Lett., 22, pp. 450-451, 1986.
3. S. K. Korotky, et al, "4 Gbit/s transmission experiment over 117km of optical fiber using a Ti:LiNbO<sub>3</sub> external modulator," J. Lightwave Technol., vol. LT-3, pp. 1027-1030, 1985.
4. C. M. Gee, G. D. Thurmond, and H.W. Yen, "Traveling-Wave Electrooptic Modulators," Applied Optics, Vol. 22, No. 13, pp. 2034-2037, Jul. 1983.
5. 鄭洪植, "진행파형 전기광학 집적소자에 대한 전기의 위상정합에 관한 연구," 전자공학회 논문집, 제29권, A편, 제8호, pp. 41-48, 1992년 8월.
6. C. M. Kim and R. V. Ramaswamy, "Overlap Integral Factors in Integrated Optic Modulators and Switches," J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 7, pp. 1063-1070.
7. R. C. Alferness, "Waveguide Electrooptic Modulators," IEEE Trans. MTT, Vol. 30 No. 8, pp. 1121-1137, Aug. 1982.
8. M. Rangaraj, T. Hosoi, and M. Kondo, "A Wide-Band Ti:LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulator with

- a Conventional Coplanar Waveguide Type Electrode," IEEE Photonic. Technol. Lett., Vol. 4, No. 9, pp. 1020-1022, Sep. 1992.
9. Haeyang Chung, William S.C. Chang, and Eric L. Adler, "Modeling and Optimization of Traveling Wave LiNbO<sub>3</sub> Interferometric Modulators," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 27, No. 3, pp. 608-617, Mar. 1991.
10. J. L. Jackel, "Suppression of outdiffusion titanium diffused LiNbO<sub>3</sub>: a review," J. Opt. Commun. vol. 3, pp. 82-85, 1982.



鄭洪植(Hong Sik Jung) 정회원  
1959년 6월 25일생  
1982년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학사)  
1984년 8월: 서강대학교 전자공학과(공학석사)  
1989년 5월: 미국 Texas A&M대학 전기공학과(공학박사)

1989년 3월 ~ 1990년 2월: 일본 전기기술자협회(JRDC), 연구원  
1990년 3월 ~ 현재: 홍익대학교, 전자전산공학과, 조교수  
※주관심분야: 광전자, 광집적회로, 광통신시스템



徐 槿 河(Chung Ha Suh) 정회원  
1946년 8월 5일생  
1970년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학사)  
1975년 2월: 홍익대학교 전기공학과(공학석사)  
1981년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학박사)

1979년 ~ 1980년: 미국 University of Minnesota 객원연구원  
1984년 ~ 1985년: 미국 University of Pennsylvania, Post-Doctor  
1976년 ~ 현재: 홍익대학교 전자공학과 교수  
※주관심분야: 반도체공정 및 공정, 화합물반도체소자, 집적회로설계



儼 震 爨(Jin Seob Eom) 정회원  
1959년 2월 20일생  
1982년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학사)  
1984년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학석사)  
1990년 12월: 미국 Texas A&M대학, 전기공학과(공학박사)

1984년 ~ 1985년: 삼성반도체(주) 연구원  
1985년 ~ 1987년: 한국통신 전임연구원  
1991년 ~ 1992년: 한국통신 전임연구원  
1992년 ~ 현재: 강원대학교 전자공학과 전임강사  
※주관심분야: 광통신, 광소자