

진행파 광변조기의 Taper영역 전극 설계 : SOR기법

정석원 · 김창민

서울시립대학교 전자공학과

(1995년 9월 14일 받음)

Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder 진행파형 광변조기의 CPW(coplanar waveguide) 전극구조, 특히 taper영역을 해석하기 위해서 SOR(successive over relaxation)법을 이용하였다. 변조기의 taper영역에서는 임피던스 정합, 즉 Z_c가 50 Ω이 만족되는 전극구조를 설계하였다. 변조기의 변조영역에서는 Z_c=50 Ω, n_{eff}=2.26인 설계파라미터와, n_{eff}=2.2, Z_c=47.7 Ω인 설계파라미터를 찾았다.

I. 서 론

고속 광변조기는 광대역 광통신 시스템과 신호처리 시스템에 중요한 필수 소자이다. 광대역 동작을 위해서 Ti:LiNbO₃ 변조기에 진행파(traveling-wave)형 전극이 사용된다^[1,3]. 진행파형 전극이 채택된 광변조기의 대역 폭은 M/W(microwave)와 광파간의 속도부정합, M/W의 특성임피던스 부정합, 그리고 전극에서의 M/W의 전파 손실 등에 의해 제한된다. M/W와 광파간의 속도부정합, M/W의 특성임피던스 부정합 문제는 기관과 전극 사이에 SiO₂ 완충박막을 증착시킴으로써 해결되어 많은 연구가 이루어져 왔다^[3,4]. 전극의 전파손실은 두꺼운 Au전극을 형성시킴으로써 줄일 수 있으며, 또한 기관의 두께를 줄여 줌으로써 고차 모드의 전파에 의한 손실을 줄일 수 있다.

진행파형 전극으로 널리 쓰이는 구조는 ACPS(asymmetric coplanar strip)형과^[1,5] CPW(coplanar waveguide)형이^[2,3,6,7] 있다. ACPS형과 CPW형 전극 구조에 대한 특성 해석에는 유사 TEM 방식으로 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM)^[8], SOR(successive over relaxation), 등각사상법 등의 수치해석법 이외에 full-wave 해석법으로 spectral-domain analysis^[7,9,10], point-matching법과^[11] mode-matching법^[7,12] 등이 주로 이용된다.

본 논문에서는 z-cut LiNbO₃ 기관을 대상으로 CPW형 전극구조를 채택하여 해석하였다. 유한차분법, 유한요소법은 정확한 해를 주어 실제 전극 해석시 많이 쓰이나^[8] 컴퓨터 메모리의 한계로 말미암아 광변조기의 taper영역 해석에는 사용하기가 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 비교적 적은 메모리로도 해석이 가능한 SOR을 이용하여

광변조기의 변조영역과 taper영역에서 전극을 설계하였다.

해석결과 taper영역에서 M/W전극의 특성임피던스 정합이 이루어지는 설계파라미터를 구하였다. 변조영역에서는 Z_c(M/W 특성임피던스)가 50 Ω일 때 n_{eff}(M/W의 유효굴절율)가 2.26인 설계파라미터와 n_{eff}가 2.2일 때 Z_c는 47.7 Ω으로 비교적 M/W와 광파간의 속도정합과 M/W의 임피던스 정합이 비교적 잘 이루어진 설계파라미터를 찾을 수 있었다.

II. CPW형 전극 해석을 위한 SOR기법

광변조기의 전극구조의 단면을 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 CPW 전극구조를 quasi-static(유사TEM)으로 해석하는 한 방법으로 Laplace 방정식을 유한차분법으로 변환한 뒤 반복적인 과정으로 해를 구하는 SOR이 일반적으로 많이 이용된다^[13]. 이 방법을 이용하여 그림 1과 같이 완전 도체로 차폐되어 있고, 전극이 유한한 두께를 가지고 있는 구조에 대해서 쉽게 해석할 수 있다. 일반적으로 비등방성 매질에서 Laplace 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{D} &= \nabla \cdot (\epsilon_x \bar{E}_x + \epsilon_y \bar{E}_y) \\ &= \epsilon_x \nabla \cdot \bar{E}_x + \epsilon_y \nabla \cdot \bar{E}_y \\ &= \epsilon_x \nabla \cdot \left(-\hat{x} \frac{\partial \phi}{\partial x^2} \right) + \epsilon_y \nabla \cdot \left(-\hat{y} \frac{\partial \phi}{\partial y^2} \right) \\ &= -\epsilon_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \epsilon_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

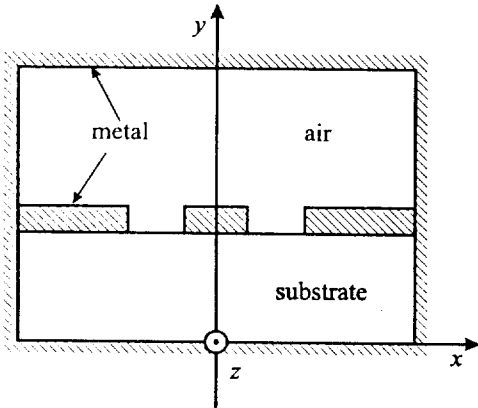


그림 1. CPW 전극구조의 단면.

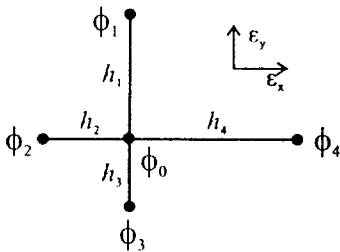


그림 2. 비등방성 매질에서의 유한차분방정식.

여기서 ϕ 는 단면의 전위함수이며, 단면만을 고려하므로 위 식의 전개과정에서 quasi TEM을 가정하므로 z방향의 전계성분은 무시하였다. 식에서 위 결과식을 다시 써 보면

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

이다. 등방성매질에서는 $\epsilon_x = \epsilon_y$ 이므로

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

그러면 위에서 유도된 Laplace 방정식을 그림 1과 같은 CPW형 전극 구조에 대해 적용해 본다. 비등방성 매질에서의 Laplace 방정식 (2)를 가지고 그림 2와 같이 5개 점의 전위사이의 차분방정식 이끌어 본다. 식 (2)를 차분형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\epsilon_x \frac{(\phi_4 - \phi_0)/h_4 - (\phi_0 - \phi_2)/h_2}{(h_4 + h_2)/2} + \epsilon_y \frac{(\phi_1 - \phi_0)/h_1 - (\phi_0 - \phi_3)/h_3}{(h_1 + h_3)/2} = 0 \quad (4)$$

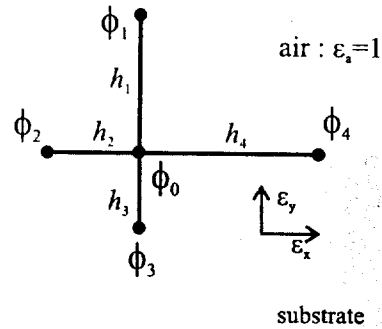


그림 3. 공기와 유전체 경계에서의 유한차분방정식.

식(4)를 ϕ_0 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\phi_0 = \frac{\phi_1}{\left(1 + \frac{h_1}{h_3}\right)\left(1 + \frac{\epsilon_x h_1 h_3}{\epsilon_y h_2 h_4}\right)} + \frac{\phi_2}{\left(1 + \frac{h_2}{h_4}\right)\left(1 + \frac{\epsilon_y h_2 h_4}{\epsilon_x h_1 h_3}\right)} + \frac{\phi_3}{\left(1 + \frac{h_3}{h_1}\right)\left(1 + \frac{\epsilon_x h_1 h_3}{\epsilon_y h_2 h_4}\right)} + \frac{\phi_4}{\left(1 + \frac{h_4}{h_2}\right)\left(1 + \frac{\epsilon_y h_2 h_4}{\epsilon_x h_1 h_3}\right)} \quad (5)$$

$h_1 = h_2 = h_3 = h_4$ 인 경우 식 (5)는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\phi_0 = \frac{1}{2(\epsilon_x + \epsilon_y)} (\epsilon_y \phi_1 + \epsilon_x \phi_2 + \epsilon_y \phi_3 + \epsilon_x \phi_4) \quad (6)$$

한편 공기 중에서는 $\epsilon_x = \epsilon_y = 1$ 이므로, 식 (5)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\phi_0 = \frac{\phi_1}{\left(1 + \frac{h_1}{h_3}\right)\left(1 + \frac{h_1 h_3}{h_2 h_4}\right)} + \frac{\phi_2}{\left(1 + \frac{h_2}{h_4}\right)\left(1 + \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3}\right)} + \frac{\phi_3}{\left(1 + \frac{h_3}{h_1}\right)\left(1 + \frac{h_1 h_3}{h_2 h_4}\right)} + \frac{\phi_4}{\left(1 + \frac{h_4}{h_2}\right)\left(1 + \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3}\right)} \quad (7)$$

이때 $h_1 = h_2 = h_3 = h_4$ 라면 식 (7)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\phi_0 = \frac{1}{4} (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4) \quad (8)$$

다음으로 그림 3과 같이 공기와 유전체 사이의 경계에서의 차분방정식을 이끌어 본다. Laplace 방정식으로부터 유한차분형태를 이끌어 내기 위해서 다음의 적분식을 고려한다.

$$\int_{-h_3/2}^{0^-} \left(\epsilon_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) dy + \int_{0^+}^{h_1/2} \epsilon_a \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) dy = 0$$

여기서 ϵ_a 는 공기의 비유전율이다. 위 식의 첫번째 항은 $[-h_3/2, 0^-]$ 의 구간에 대해서 비등방성 매질에서의 Laplace 방정식을 적용한 것이고, 두 번째 항은 $[0^+, h_1/2]$ 의 구간에 대해서는 공기에서의 Laplace 방정식을 적용한 것이다. 위 식을 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{h_3}{2} \epsilon_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{y=0} + \epsilon_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=-h_3/2} \right) \\ & + \frac{h_1}{2} \epsilon_a \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{y=0^+} + \epsilon_a \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=h_1/2} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0^+} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에 경계조건, 즉

$$\epsilon_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0^-} = \epsilon_a \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0^+}$$

를 적용하고, 유한차분형태로 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\epsilon_x h_3 + \epsilon_a h_1}{2} \frac{\phi_4 - \phi_0}{h_4} - \frac{\phi_0 - \phi_2}{h_2} + \epsilon_a \frac{\phi_1 - \phi_0}{h_1} - \epsilon_y \frac{\phi_0 - \phi_3}{h_3} = 0$$

식 (11) ϕ_0 에 대하여 정리하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_0 = & \frac{\phi_1}{\left(1 + \frac{\epsilon_x h_1}{\epsilon_a h_3} + \frac{\epsilon_x h_1 h_3}{\epsilon_a h_2 h_4} + \frac{h_1^2}{h_2 h_4} \right)} \\ & + \frac{\phi_2}{\left(1 + \frac{h_2}{h_4} \left[1 + \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3} \left(\frac{\epsilon_y h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_x h_3 + \epsilon_a h_1} \right) \right] \right)} \\ & + \frac{\phi_3}{\left(1 + \frac{\epsilon_x h_3}{\epsilon_y h_1} + \frac{\epsilon_x h_1 h_3}{\epsilon_y h_2 h_4} + \frac{\epsilon_x h_3^2}{\epsilon_y h_2 h_4} \right)} \\ & + \frac{\phi_4}{\left(1 + \frac{h_4}{h_2} \left[1 + \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3} \left(\frac{\epsilon_y h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_x h_3 + \epsilon_a h_1} \right) \right] \right)} \end{aligned} \quad (12)$$

$h_1 = h_2 = h_3 = h_4$ 일 때 식 (12)는

$$\phi_0 = \frac{\phi_1}{\left(2 + \frac{\epsilon_y}{\epsilon_a} + \frac{\epsilon_x}{\epsilon_a} \right)} + \frac{\phi_2}{2 \left(1 + \frac{\epsilon_y + \epsilon_a}{\epsilon_x + \epsilon_a} \right)}$$

$$+ \frac{\phi_3}{\left(1 + 2 \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} + \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \right)} + \frac{\phi_4}{2 \left(1 + \frac{\epsilon_y + \epsilon_a}{\epsilon_x + \epsilon_a} \right)} \quad (13)$$

지금까지 유도한 식들을 다음과 같은 형태로 변환한다.

$$\begin{aligned} \phi_0 = & \frac{\phi_1}{1 + C_{11} \frac{h_1}{h_3} + C_{12} \frac{h_1 h_3}{h_2 h_4} + C_{13} \frac{h_1^2}{h_2 h_4}} \\ & + \frac{\phi_2}{1 + C_{21} \frac{h_2}{h_4} + C_{22} \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3} + C_{23} \frac{h_2^2}{h_1 h_3}} \\ & + \frac{\phi_3}{1 + C_{31} \frac{h_3}{h_1} + C_{32} \frac{h_1 h_3}{h_2 h_4} + C_{33} \frac{h_3^2}{h_2 h_4}} \\ & + \frac{\phi_4}{1 + C_{41} \frac{h_4}{h_2} + C_{42} \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3} + C_{43} \frac{h_4^2}{h_1 h_3}} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)처럼 표현했을 때 그림 1의 각 경계에 대해서 표 1에 각각의 계수 C_{ij} 를 구하여 수록하였다.

식 (14)와 같은 유한차분방정식을 푸는 가장 일반적인 방법이 SOR(successive over relaxation)이다. SOR을 적용하기 위해서 그림 1과 같은 구조를 그림 4처럼 x와 y 방향으로 무수히 많은 점으로 나눈 뒤 중앙 전극의 전위를 V_0 로, 그리고 나머지 전극을 0으로 설정하고 나머지 점들은 임의의 전위값으로 설정한다.

위의 그림에서 각각의 점들의 전위는 다음식을 반복함에 따라 점점 어떤 값으로 수렴한다.

$$\phi_0^{new} = \phi_0^{old} - aR \quad (15)$$

여기서

$$R = \phi_0 - \left(\frac{\phi_1}{A} + \frac{\phi_2}{B} + \frac{\phi_3}{C} + \frac{\phi_4}{D} \right) \quad (16)$$

$$A = 1 + C_{11} \frac{h_1}{h_3} + C_{12} \frac{h_1 h_3}{h_2 h_4} + C_{13} \frac{h_1^2}{h_2 h_4} \quad (17a)$$

$$B = 1 + C_{21} \frac{h_2}{h_4} + C_{22} \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3} + C_{23} \frac{h_2^2}{h_1 h_3} \quad (17b)$$

$$C = 1 + C_{31} \frac{h_3}{h_1} + C_{32} \frac{h_1 h_3}{h_2 h_4} + C_{33} \frac{h_3^2}{h_2 h_4} \quad (17c)$$

표 1. 각 경계에서의 계수 C의 값

경계	Air.-Air.	Air.-Buf.	Air.-Sub.	Buf.-Sub.	Sub.-Sub.
C ₁₁	1	ϵ_b/ϵ_a	ϵ_f/ϵ_a	ϵ_f/ϵ_b	1
C ₁₂	1	ϵ_b/ϵ_a	ϵ_a/ϵ_a	ϵ_a/ϵ_b	ϵ_a/ϵ_f
C ₁₃	1	1	1	1	ϵ_a/ϵ_f
C ₂₁	1	1	1	1	1
C ₂₂	1	$\frac{\epsilon_b h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_b h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_b h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_b h_1}$	ϵ_f/ϵ_a
C ₂₃	1	$\frac{\epsilon_b h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_b h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_b h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_b h_1}$	ϵ_f/ϵ_a
C ₃₁	1	ϵ_a/ϵ_b	ϵ_a/ϵ_f	ϵ_b/ϵ_f	1
C ₃₂	1	ϵ_a/ϵ_b	ϵ_a/ϵ_f	ϵ_b/ϵ_f	ϵ_a/ϵ_f
C ₃₃	1	1	ϵ_a/ϵ_f	ϵ_a/ϵ_f	ϵ_a/ϵ_f
C ₄₁	1	1	1	1	1
C ₄₂	1	$\frac{\epsilon_b h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_b h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_b h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_b h_1}$	ϵ_f/ϵ_a
C ₄₃	1	$\frac{\epsilon_b h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_b h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_a h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_a h_1}$	$\frac{\epsilon_f h_1 + \epsilon_b h_3}{\epsilon_f h_3 + \epsilon_b h_1}$	ϵ_f/ϵ_a

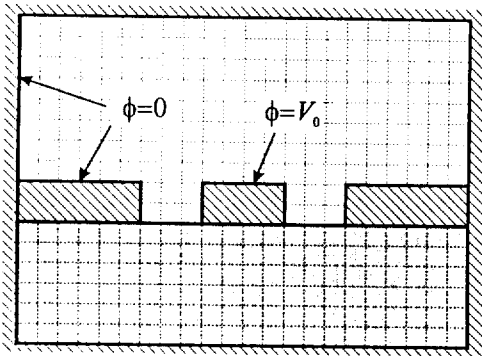


그림 4. CPW전극구조의 요소분할.

$$D = 1 + C_{41} \frac{h_4}{h_2} + C_{42} \frac{h_2 h_4}{h_1 h_3} + C_{43} \frac{h_4^2}{h_1 h_3} \quad (17d)$$

이다. 여기서 a 는 가속계수라 하여 해의 수렴속도를 결정해 주는 인자이다. 위의 과정을 통하여 전극 구조 단면에서의 전위분포가 구해지면 전계분포와 전극상의 전하분포는 그로부터 구할 수 있다. 충전하는 다음식으로 구할 수 있다.

$$Q = \epsilon_0 \epsilon_r \oint E_n \cdot ds \quad (18)$$

여기서 적분경로는 중앙 전극주위를 둘러싸는 임의의 경로이다. 캐패시턴스는 충전하와 중앙전극의 전위와의 비로 구해진다. 즉

$$C = \frac{Q}{V} \quad (19)$$

특성임피던스(characteristic impedance) Z_c 와 전파상수는 두 캐패시턴스 C_m 과 C_0 에 의해 구해진다.

$$Z_c = Z_c^0 \sqrt{\frac{C_0}{C_m}} \quad (20)$$

$$\beta = \beta_0 \sqrt{\frac{C_m}{C_0}} = \sqrt{\epsilon_m} \beta_0 \quad (21)$$

여기서

$$Z_c^0 = \frac{1}{c C_0}$$

$$\beta_0 = \frac{\omega}{c} \quad c: \text{광속}$$

다. 식 (20), (21)에서 C_0 는 그림 1의 전극구조에서 유전체 기판을 공기로 모두 대체했을 때의 단위 길이당 캐패시턴스이고, C_m 은 유전체기판이 존재할 때의 단위 길이당 캐패시턴스이다. 한편 식 (21)에서 $\sqrt{\epsilon_m}$ 를 마이크로파의 유효굴절률(n_{eff})이라 부른다. 즉

$$\sqrt{\epsilon_m} = n_{eff} = \sqrt{\frac{C_m}{C_0}} \quad (22)$$

앞의 식 (18)로부터 전극 주위를 따라 경로적분을 함으

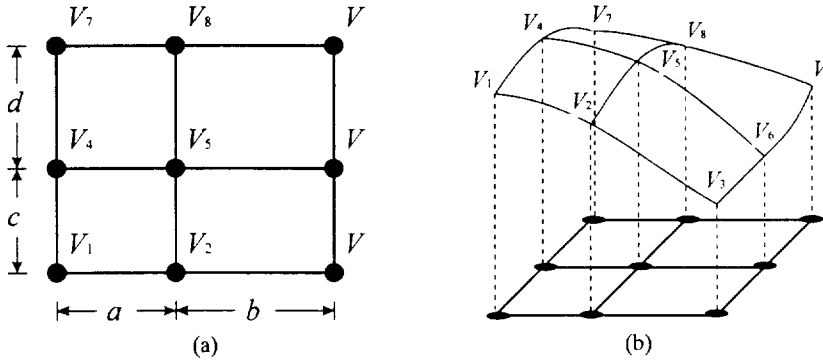


그림 5. (a) 선형 2차 보간함수 (b) 선형 2차 보간함수로 표현된 전위분포.

로써 총전하량을 구할 수 있는데, SOR에 의해 구해진 전위분포는 연속적인 값이 아닌 이산적인 값이다. 그러므로 식 (18)에 의해 전계를 적분하기 위해서는 이산적인 전위값들을 연속적인 값으로 취해야 할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 5와 같이 9개의 점들로 이루어지는 직사각형 2차선형 보간함수를 사용한다. 즉

$$\phi_1 = \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{x}{a+b}\right) \left(1 - \frac{y}{c}\right) \left(1 - \frac{y}{c+d}\right) \quad (23a)$$

$$\phi_2 = \left(\frac{a+b}{b}\right) \frac{x}{a} \left(1 - \frac{x}{a+b}\right) \left(1 - \frac{y}{c}\right) \left(1 - \frac{y}{c+d}\right) \quad (23b)$$

$$\phi_3 = \left(-\frac{a}{b}\right) \left(\frac{x}{a+b}\right) \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{c}\right) \left(1 - \frac{y}{c+d}\right) \quad (23c)$$

$$\phi_4 = \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{x}{a+b}\right) \left(\frac{c+d}{d}\right) \frac{y}{c} \left(1 - \frac{y}{c+d}\right) \quad (23d)$$

$$\phi_5 = \left(\frac{a+b}{b}\right) \frac{x}{a} \left(1 - \frac{x}{a+b}\right) \left(\frac{c+d}{d}\right) \frac{y}{c} \left(1 - \frac{y}{c+d}\right) \quad (23e)$$

$$\phi_6 = \left(-\frac{a}{b}\right) \left(\frac{x}{a+b}\right) \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(\frac{c+d}{d}\right) \frac{y}{c} \left(1 - \frac{y}{c+d}\right) \quad (23f)$$

$$\phi_7 = \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{x}{a+b}\right) \left(-\frac{c}{d}\right) \left(\frac{y}{c+d}\right) \left(1 - \frac{y}{c}\right) \quad (23g)$$

$$\phi_8 = \left(\frac{a+b}{b}\right) \frac{x}{a} \left(1 - \frac{x}{a+b}\right) \left(-\frac{c}{d}\right) \left(\frac{y}{c+d}\right) \left(1 - \frac{y}{c}\right) \quad (23h)$$

$$\phi_9 = \left(-\frac{a}{b}\right) \left(\frac{x}{a+b}\right) \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(-\frac{c}{d}\right) \left(\frac{y}{c+d}\right) \left(1 - \frac{y}{c}\right) \quad (23i)$$

그림 5의 영역에서 전위함수 $\phi(x, y)$ 는 위의 선형 보간함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^9 V_i \phi_i \quad (24)$$

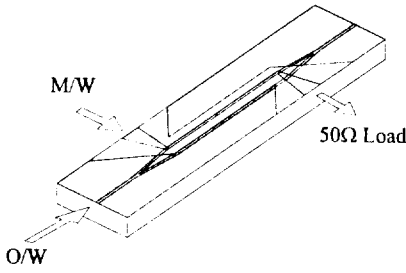
식 (24)를 이용하여 직사각형 요소에서의 x 에 관한 미소 전하량을 구하면

$$\begin{aligned} \Delta Q_x &= \epsilon_s \epsilon_0 \int_0^{a+b} E_x dx \Big|_{y=y_0} = -\epsilon_s \epsilon_0 \int_0^{a+b} \frac{\partial \phi}{\partial y} dx \Big|_{y=y_0} \\ &= \epsilon_s \epsilon_0 \left\{ \frac{(2c+d)}{6abc(c+d)} [b(2a^2+ab-b^2)V_1 + (a+b)^3 V_2 \right. \\ &\quad + a(a^2-ab-2b^3)V_3] - \frac{(c+d)}{6abcd} [b(2a^2+ab-b^2)V_4 \\ &\quad + (a+b)^3 V_5 + a(a^2-ab-2b^2)V_6] + \frac{c}{6abd(c+d)} \\ &\quad \left. [b(2a^2+ab-b^2)V_7 + (a+b)^3 V_8 + a(a^2-ab-2b^2)V_9] \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

이 되고, 마찬가지로 y 에 관한 미소 전하량은 다음과 같다.

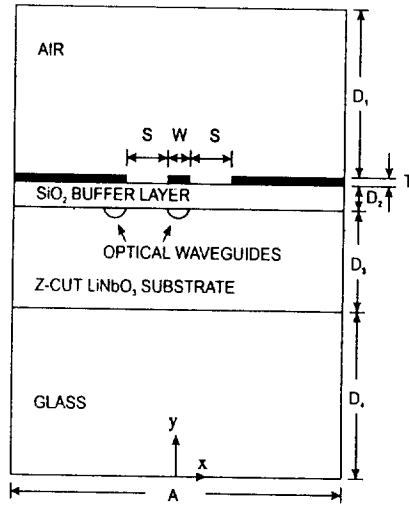
$$\begin{aligned} \Delta Q_y &= \epsilon_s \epsilon_0 \int_0^{c+d} E_y dy \Big|_{x=x_0} = -\epsilon_s \epsilon_0 \int_0^{c+d} \frac{\partial \phi}{\partial x} dy \Big|_{x=x_0} \\ &= \epsilon_s \epsilon_0 \left\{ \frac{(2a+b)}{6acd(a+b)} [d(2c^2+cd-d^2)V_1 + (c+d)^3 V_4 \right. \\ &\quad + c(c^2-cd-2d^2)V_7] - \frac{(a+b)}{6abcd} [d(2c^2+cd-d^2)V_2 \\ &\quad + (c+d)^3 V_5 + c(c^2-cd-2d^2)V_8] + \frac{a}{6bcd(a+b)} \\ &\quad \left. [d(2c^2+cd-d^2)V_3 + (c+d)^3 V_6 + c(c^2-cd-2d^2)V_9] \right\} \quad (26) \end{aligned}$$

그러면 총전하량은 식 (18)처럼 전극주위를 둘러싼 전 영역에 대하여 식 (25), (26)으로 미소 전하량을 구하여 합한 양이다. 즉



(a)

그림 6. 진행파 전극 광변조기와 그 단면도.



(b)

$$Q = \Sigma(\Delta Q_x + \Delta Q_y) \quad (27)$$

이때 정전용량은

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\Sigma(\Delta Q_x + \Delta Q_y)}{V_0} \quad (28)$$

이다.

III. 전극 설계

그림 6은 Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder 광변조기와 그 단면도이다. LiNbO₃ 기판 위에 Ti를 확산시켜 광도파로를 형성시킨 뒤 그 위에 SiO₂층을 성장시키고, 그 위에 CPW형 전극을 형성시킨 그림이다. 본 장에서는 이러한 구조에 SOR을 적용하여 M/W의 특성임피던스(Z)와 유효굴절율(n_{eff})을 계산하여 광대역 광변조기의 전극 구조를 설계한다.

본 해석에서 M/W전극의 특성임피던스 정합과 도파광과 M/W 변조파의 속도 정합을 효과적으로 하기 위하여 1 μm 두께의 SiO₂ 완충박막이 기판과 전극사이에 증착된 경우를 고려한다. 표 2에 본 해석에서 고정된 파라미터값들을 수록하였다. 표에서 ε₀는 그림 6(a)에서 기판 밑의 유리판의 비유전율이다.

1. 적분경로길이에 따른 SOR해의 수렴

본 절에서는 SOR에 의해서 전위분포가 구해졌을 때 이 전위분포로부터 전하량을 구할 때 적분경로에 따른

표 2. 고정된 파라미터 값

ε _x	43	ε _z	2.25
ε _y	28	D ₂	1 μm
ε ₀	3.9	D ₃	500 μm

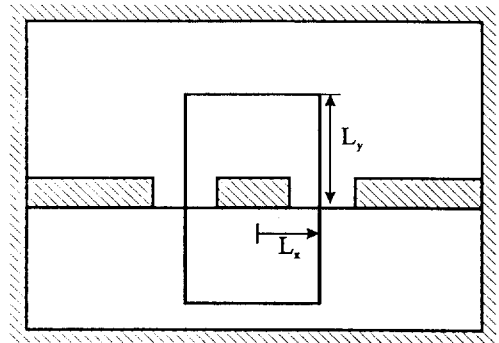


그림 7. 적분경로.

해의 수렴도를 살펴본다. 그림 7에 적분경로를 그려 놓았다.

Gauss법칙에 의하면 적분경로에 무관하게 전하량은 같아야 한다. 그러나 SOR에 의해 구해진 전위분포는 이산적인 값이고, 이것을 앞에서 정의한 보간함수를 사용하여 연속적인 함수로 바꾼 뒤 이것으로 전하량을 계산하기 때문에 적분경로에 따라 해가 달라질 수 있다.

표 3의 첫수 파라미터에 대하여 x축 방향, y축 방향의

적분경로에 따른 해의 수렴성을 검토하고자 한다.

그림 8과 9는 x축 방향의 적분경로길이(그림 7의 L_x)와 y축 방향의 적분경로길이(그림 7의 L_y)에 따른 M/W의 특성임피던스(Z_c)와 마이크로파의 유효굴절율(n_{eff})을 보여준다. 그림 8에서 L_x 를 증가시키에 따라 Z_c 는 조금씩 증가하고, n_{eff} 는 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있으나 변화의 정도는 그리 심하지 않다. 한편 그림 9에서 L_y 를 증가시키에 따라 Z_c 와 n_{eff} 는 큰 변화를 나타낸 후 점차 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이상에서 SOR의 해는 L_x 보다는 L_y 에 대해 심한 변화를 하며 수렴된 해를 얻기 위해서 L_y 는 충분히 커야 한다.

표 3. 그림 8과 9의 파라미터 값

W	5 μm	D_1	500 μm
S	15 μm	D_2	1 μm
T	10 μm	D_3	500 μm
A	500 μm	D_4	0 μm

2. 변조영역에서의 CPW전극 설계

변조영역은 실제적으로 M/W의 인가에 의해 광의 변조가 이루어지는 영역이다. 그러므로 고속의 변조를 위해서는 M/W의 특성임피던스 정합과, 광파와 M/W간의 속도 정합이 모두 이루어져야 한다.

그림 10, 11, 12는 전극의 두께를 각각 8 μm , 10 μm , 12 μm 이고, 전극의 간격(S)와 중앙전극의 폭(W)을 변화시키면서 M/W의 특성임피던스와 유효굴절율을 계산한 것이다.

그림 10에서 중앙전극의 폭(W)이 작을수록 특성임피던스 정합과 M/W와 광파의 속도정합이 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그림에서 $W=6 \mu\text{m}$ 이고 Z_c 가 50 Ω 일 때 n_{eff} 는 2.40정도이고, n_{eff} 가 2.2일 때 Z_c 는 42.8 Ω 을 나타내 특성임피던스 정합과 속도 정합이 잘 이루어졌다고 볼 수 없다.

그림 11에서도 역시 W가 작을수록 특성임피던스 정합과 속도 정합이 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그

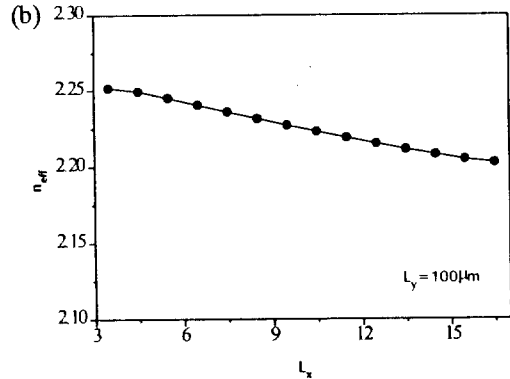
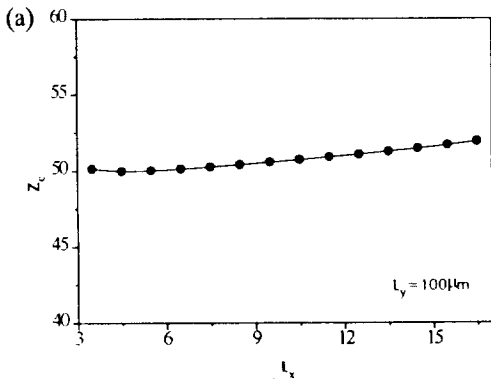


그림 8. 적분경로(L_x)에 대한 SOR해의 수렴도 (a) Z_c , (b) n_{eff} .

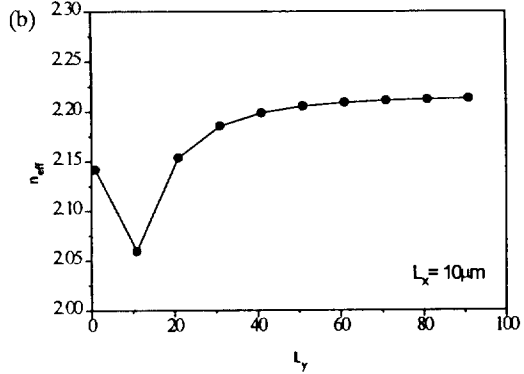
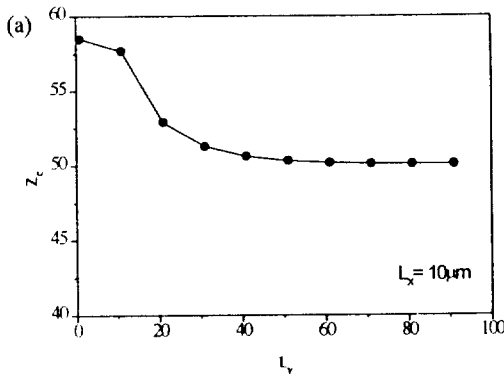


그림 9. 적분경로(L_y)에 대한 SOR해의 수렴도 (a) Z_c , (b) n_{eff} .

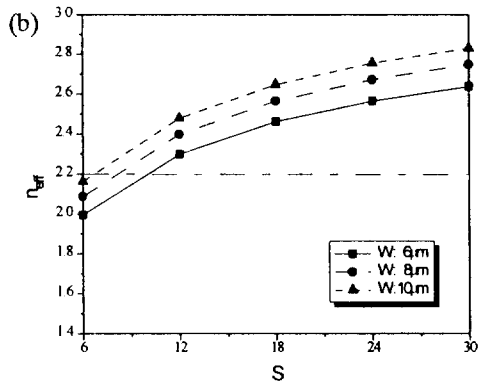
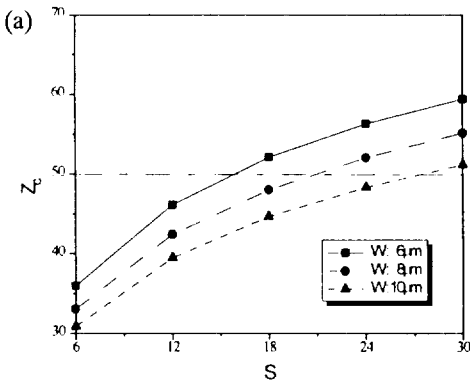


그림 10. 전극의 두께(T)가 8 μm 일 때 (a) Z_c , (b) n_{eff} .

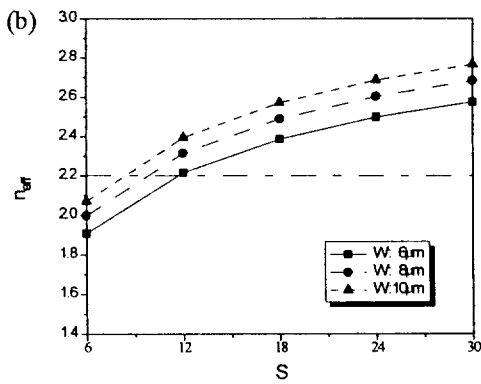
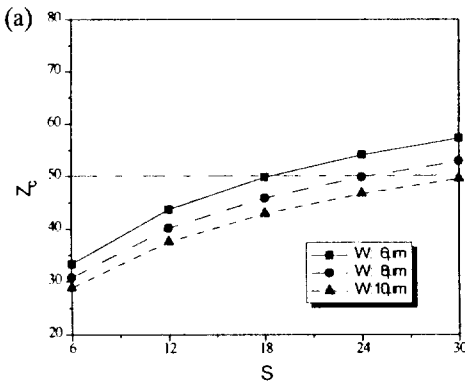


그림 11. 전극의 두께(T)가 10 μm 일 때 (a) Z_c , (b) n_{eff} .

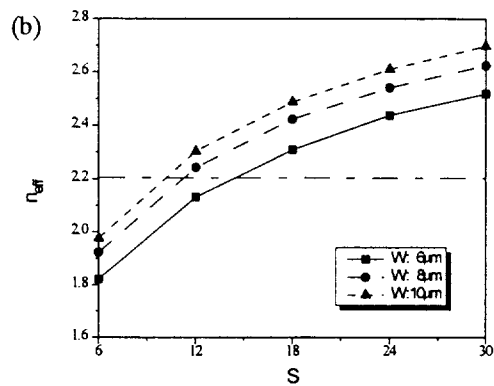
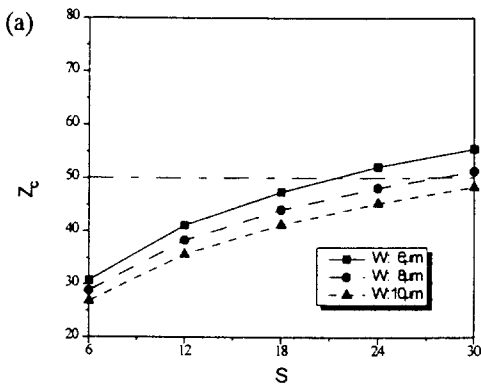


그림 12. 전극의 두께(T)가 12 μm 일 때 (a) Z_c , (b) n_{eff} .

림에서 $W=6 \mu\text{m}$ 이고 Z_c 가 50 Ω 일 때 n_{eff} 는 2.39정도이고, n_{eff} 가 2.2일 때 Z_c 는 43.1 Ω 을 나타내 $T=8 \mu\text{m}$ 일 때보다 약간의 개선이 이루어진 것을 볼 수 있다.

그림 12에서 $W=6 \mu\text{m}$ 이고 Z_c 가 50 Ω 일 때 n_{eff} 는 2.38

정도이고, n_{eff} 가 2.2일 때 Z_c 는 43.6 Ω 을 나타내 역시 약간의 개선이 이루어지고 있다.

그림 10, 11, 12에 공통적으로 나타나는 사실은 중앙 전극의 폭(W)이 작을수록 $Z_c=50 \Omega$ 과 $n_{\text{eff}}=2.2$ 에 근접

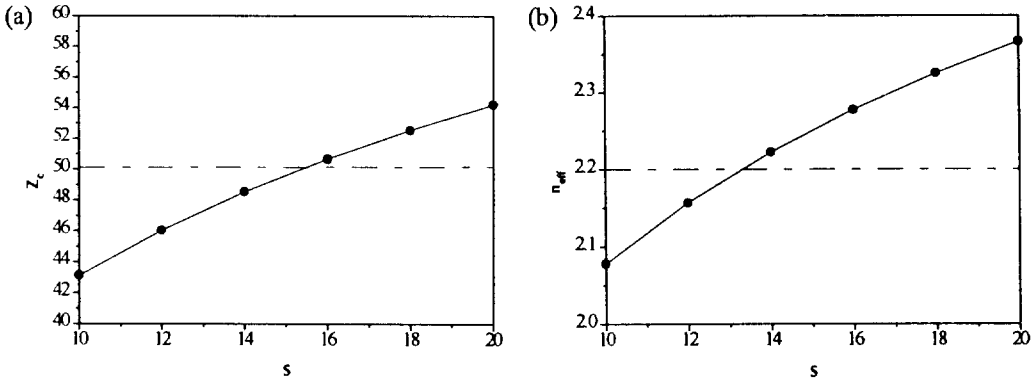


그림 13. $T=10\ \mu\text{m}$, $W=5\ \mu\text{m}$ 일 때 (a) Z_c , (b) n_{eff} .

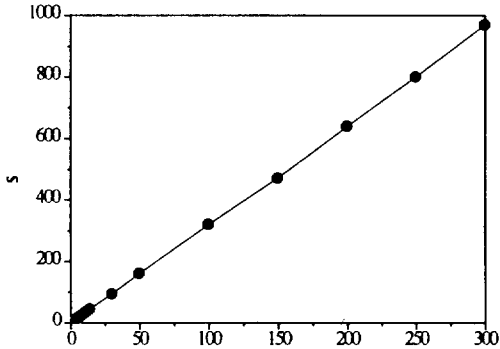


그림 14. 전극의 두께가 $10\ \mu\text{m}$ 일 때 Taper영역에서의 CPW전극.

하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 10, 11, 12의 어느 것도 $Z_c=50\ \Omega$ 와 $n_{\text{eff}}=2.2$ 가 동시에 만족되는 것을 찾아 볼 수 없다. 그림 10, 11, 12를 통하여 나타나는 또 하나의 사실은 전극두께(T)가 두꺼울수록 $Z_c=50\ \Omega$, $n_{\text{eff}}=2.2$ 를 만족시키는 전극간격(S)이 넓어진다는 점이다. Mach-Zehnder 광변조기의 경우 도파로 사이의 직접 커플링이 이루어 지지 않기 위해서 S는 $10\ \mu\text{m}$ 이상이어야 한다. 이런 점에서 그림 6에서 전극간격과 두 도파로간격이 같다는 사실을 염두에 둔다면 두 도파로 사이의 간격(S)은 광변조기 설계시 반드시 고려되어야 할 사항이다.

앞의 사실에서 중앙전극의 폭(W)이 작을수록 특성임피던스 정합과 속도 정합에 근접한다는 사실로부터 $T=10\ \mu\text{m}$ 으로 하고 W를 $5\ \mu\text{m}$ 로 했을 때 어떠한 결과를 나타내는지 살펴보았다. 그림 13이 그 결과이다. 이 결과는 앞의 어떠한 결과보다도 비교적 양호하다. 즉 $Z_c=50\ \Omega$ 일 때 $n_{\text{eff}}=2.26$ 정도이고, $n_{\text{eff}}=2.2$ 일 때 $Z_c=47.7\ \Omega$ 정도로 비교적 특성임피던스 정합과 M/W와 광파간의 속도 정합이 잘 이루어진 설계치라 말할 수 있다.

3. Taper영역에서의 CPW전극 설계

Taper영역은 광변조기의 feeding부에서 변조영역까지이며, M/W가 변조영역까지 신호가 왜곡되지 않고 전달되기 위해서 특성임피던스 정합이 이루어져야 한다.

광변조기의 feeding부의 중앙전극의 폭은 대체로 약 $300\ \mu\text{m}$ (0.3 mm) 이상이다. 이것은 SiO_2 완충박막이 $1\ \mu\text{m}$ 인데 비해 중앙전극의 폭이 상당히 크므로 인해서 SOR적용시 많은 메모리와 방대한 양의 계산과 시간이 요구된다. 본 논문에서 변조영역에 대해서는 균일 분할 SOR을 이용하여 해석을 진행하였으며, taper영역에 대해서는 비균일 분할 SOR을 이용하여 계산시간과 계산량을 효과적으로 줄일 수 있었다.

그림 14는 taper영역에서 중앙전극의 폭(W)을 $300\ \mu\text{m}$ 까지 증가시키면서 이 때 $Z_c=50\ \Omega$ 를 만족시키는 전극간격(S)을 구하여 그린 그림이다. 그림에서 확인할 수 있는 사실은 중앙전극의 폭이 증가함에 따라 $Z_c=50\ \Omega$ 를 만족시키는 전극간격(S)도 거의 선형적으로 증가한다는 사실이다.

IV. 결 론

Ti:LiNbO_3 광변조기의 CPW형 진행과 전극을 대상으로 SOR기법을 이용하여 해석하였다. M/W와 도파로의 속도 정합과 M/W 전극의 특성임피던스 정합을 위해서 기판과 전극 사이에 $1\ \mu\text{m}$ SiO_2 완충박막이 증착된 경우를 가정하였다. 변조영역에서 $Z_c=50\ \Omega$ 와 $n_{\text{eff}}=2.2$ 를 동시에 만족시키는 CPW형 전극구조를 찾을 수 없었지만 $Z_c=50\ \Omega$ 와 $n_{\text{eff}}=2.26$ 인 설계파라미터와 $n_{\text{eff}}=2.2$ 일 때 $Z_c=47.7\ \Omega$ 인 설계파라미터를 찾을 수 있었다. 이는 M/W와 광파간의 속도 정합과 M/W의 특성임피던스 정합이 비교적 잘 이루어진 것이라 볼 수 있다. 한편 taper영역에

대해서는 중앙전극의 폭(W)을 증가시키면서 M/W전극의 특성임피던스 정합을 이루는, 즉 $Z_c=50 \Omega$ 인 설계 파라미터를 구하였는데, 중앙전극의 폭(W)을 증가시킴에 따라 $Z_c=50 \Omega$ 을 만족시키는 전극의 간격(S)은 거의 선형적으로 증가하는 사실을 확인할 수 있었다.

이상으로 Ti:LiNbO₃ 광변조기의 변조영역과 taper 영역에서의 전극의 설계가 모두 완료되었다. 이상의 파라미터로 광변조기를 제작할 경우, [8]로부터 대역폭을 예측해 본 결과 1.3 μm 파장에서 5 V 전원의 동작으로 30~40 GHz에 이르는 넓은 대역폭을 가질 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] C. M. Gee, G. D. Thurmond and H. W. Yen, Appl. Phys. Lett., **43**(11), 998-1000(1983).
 [2] R. A. Becker, Appl. Phys. Lett., **45**(11), 1168-1170 (1984).
 [3] M. Rangaraj, T. Hosoi and M. Kondo, IEEE Photon. Technol. Lett., **4**(9), 1020-1022(1992).
 [4] K. Kawano *et al.*, IEEE Photon. Lett., **1**(2), 33 (1989).
 [5] S. K. Korotky, G. Eisenstein, R. S. Tucker, J. J.

Veselka and G. Raybon, Appl. Phys. Lett., **50**(23), 1631-1633(1987).
 [6] M. Riazat, R. Majidi-Ahy and I. J. Feng, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **38**(3), 245-251 (1990).
 [7] Y. Fukuoka, Y. C. Shih and T. Itoh, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **MTT-31**(7), 567-573 (1983).
 [8] 김창민, 한상필, 전자공학회논문지, **32A**(2), 96-110 (1995).
 [9] K. Kawano, T. Kitoh, H. Jumonji, T. Nozawa, M. Yanagibashi and S. Suzuki, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **39**(9), 1595-1601(1991).
 [10] S. G. Pintzos, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **39**(2), 239-246(1991).
 [11] S. Kossowski, F. Bogelsack and I. Wolff, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **36**(8), 1265-1270 (1988).
 [12] C. K. C. Tzuang and J. D. Tseng, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **39**(10), 1701-1711(1991).
 [13] K. C. Gupta *et al.*, *Microstrip Lines and Slotlines* (ARTECH, 1979) pp. 13-15.

Design of Electrodes of the Tapered Region of the Traveling-Wave Optical Modulator: SOR Method

Suk-Won Jung and Chang-Min Kim

Department of Electronics Engineering, Seoul City Univ., Jeonnonng-dong 90, Dongdaemun-ku, Seoul, 130-743, Korea

(Received: September 14, 1995)

We employ the SOR method to analyze CPW electrodes of Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder traveling-wave optical modulator in the tapered region of an optical modulator. In the tapered region of the modulator, we design the electrodes satisfying $Z_c=50 \Omega$. In the modulation region, we find two sets of design parameters. One set is for $Z_c=50 \Omega$, $n_{eff}=2.26$ and the another is for $n_{eff}=2.2$, $Z_c=47.7 \Omega$.