

폴리머 마하-젠더 광 변조기의 푸시풀 동작을 위한 이중 마이크로스트립 전극구조에 대한 연구

정희원 김 광택*, 이소영*, 송재원*, 김성국**, 강신원***

A Study on Dual Microstrip Electrode for Push-Pull Operation of the Polymeric Mach-Zehnder Optical Modulators

Kwang Taek Kim*, Soo Young Lee*, Jae Won Song*, Sung Kuk Kim**,
Shin won Kang*** Regular Member

요약

본 논문에서는 전기광학 폴리머를 이용한 마하-젠더 광변조기의 푸시풀(push-pull) 동작을 위한 새로운 형태의 이중 마이크로스트립 전극을 제안하였다. 푸시풀 동작은 마하-젠더 광변조기의 대역폭이나 구동전압을 개선할 수 있다. 유한요소법(Finite element method)으로 임피던스 정합과 속도정합 조건을 찾았으며 중첩지수를 계산하였다. 전산 모의 결과는 속도정합은 전극구조와 관계없이 쉽게 달성할 수 있었지만 임피던스정합과 중첩지수는 교환관계(trade-off) 관계에 있음을 보여주고 있다. 설계된 전극 구조를 포토리소그래피(photolithography)와 전기도금(electroplating) 등의 공정으로 유리 기판위에 제작한 후 마이크로파 특성을 회로망 분석기로 측정하였다. 측정된 전극의 되돌림 손실(return loss)은 20GHz 까지 -6.5dB이하 였고 전파손실(propagation loss)은 $0.71 \text{ dB/cm}\sqrt{\text{GHz}}$ 였다. 전산 모의와 실험결과로부터 이중 마이크로스트립 전극은 간단한 제작 공정으로 마하-젠더 광변조기의 성능 개선에 이용 가능하다.

ABSTRACT

In this paper we proposed a novel dual microstrip electrode for push-pull operation of Mach-Zehnder(MZ) optical modulator based on electro-optic polymer. The push-pull operation may improve the bandwidth width or driving voltage of the MZ modulators. The finite element method was used to find the impedance and velocity matching condition and calculate the overlap integral of the dual microstrip electrode. The results of simulation show that the velocity matching condition can be easily achieved independent of electrode structure but there are some trade-offs between impedance matching and overlap integral. The designed electrode was fabricated on glass substrate using conventional photolithography and electroplating and then measured its microwave characteristics using a network analyzer. The return loss was less than -6.5dB up to 20GHz and propagation loss $0.71 \text{ dB}/(\text{cm}\sqrt{\text{GHz}})$. From the results of both simulation and measurement dual microstrip electrode makes it possible to improve the properties of MZ type optical modulators with simple fabrication process.

1. 서론

미래의 광통신망은 각 가정이나 사무실까지 연결되어 다양한 정보 서비스를 제공할 것으로 예상된다

다. 이 경우 고속 정보처리 능력을 지닌 광통신 시스템의 수요가 폭발적으로 증가할 것이다. 따라서 가격이 저렴하면서 고속 동작이 가능한 광소자 개발에 대한 관심이 고조되고 있다. 유기 고분자인 폴

* 경북대학교 전자전기공학부(kkt@palgong.kyungpook.ac.kr)
논문번호 : 98352-0811, 접수일자 : 1998년 8월 11일

** 안동정보대학

*** 경북대학교 센서공학과

리머는 가격이 무기물 광재료에 비해 저렴하고 이를 집적 광학소자의 도파물질로 응용시 소자 제작 과정이 간단하고 또한 광파와 마이크로파간의 속도 차이가 작아 넓은 대역폭을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

지금까지 폴리머를 이용한 다양한 광소자들이 개발되었으며 특히 전기광학 폴리머를 이용하여 초고속 광변조기의 가능성을 검증하기 위한 많은 연구 결과가 발표되었다. LiNBO₃ 등의 무기물을 이용하여 초고속 변조특성을 얻기 위해서는 임피던스정합과 광파와 마이크로파의 속도정합 및 광과 전기장의 효과적인 중첩을 얻기위한 매우 복잡한 전극 구조가 필요하다.^{[1][2]} 하지만 전기광학 폴리머의 낮은 분산 특성과 제작 공정상의 간편함으로 복잡한 전극을 도입하지 않고도 수십 GHz 정도의 대역폭과, 효과적인 광파와 마이크로파의 중첩을 가진 광변조기를 쉽게 구현 할수 있었다.^[3-5] 하지만 아직까지 전극구조 적정화를 통하여 성능을 개선할 여지는 많이 남아 있다. 기존에 보고된 폴리머 마하젠더 광변조기에서는 마이크로스트립 전극으로 광도파로의 한쪽가지에 변조를 위한 전기장을 인가하는 방식이 주로 이용되어 왔다. 기존의 단일 마이크로스트립 전극은 임피던스 정합을 위해 상부전극의 폭이 도파로폭 보다 4~5배 넓게 설계되어 많은 부분의 마이크로파 전력은 광변조 효과에 기여하지 못한 채 소비되었다.

본 논문에서는 두개의 마하-젠더 광도파로에 변조 마이크로파 신호를 동시에 인가하여 푸시풀(push-pull) 광변조 효과를 발생시킬 수 있는 이중 마이크로스트립(dual microstrip) 전극을 제안하였다. 두 개의 대칭적 도파로에 동일한 변조신호를 인가시 푸시풀 동작을 하기 위해선 각 도파로는 극성이 반대인 전기광학 계수(electro-optic coefficient)를 가져야 한다. 이는 전기광학 폴리머에 포켈효과(pockels effect)를 부여하기 위해 수행하는 전기장 폴링과정에서 각 도파로에 서로 반대 방향으로 dc 전기장을 인가함으로써 가능하다. 진행파형 전극구조의 특성 임피던스, 전파속도, 전기장분포 및 전파손실은 유전체와 전극의 전기적 물성과 전극구조에 의해서 결정된다. 폴리머는 마이크로파대까지 분산이 거의 없는 것으로 알려져 있기 때문에 저주파에서 측정된 유전률을 토대로 전극의 특성을 찾는 경우가 많다.^[6]

제안된 이중 마이크로스트립 전극을 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 해석하고 이를

광변조기에 응용시 대역폭과 구동전압 측면에서 가장 유리한 전극구조를 찾아내었다. 상하부 전극간의 간격이 마이크로파 파장보다 매우 작기 때문에 전극의 특성을 준정적(quasi static)분석법^[5]으로 구하였다. 설계된 전극을 제작하여 회로망 분석기로 마이크로파 특성을 측정하였고 실질적 이용가능성을 분석하였다.

II. 진행파형 전극의 동작특성

진행파형 광변조기의 특성은 도파로의 위상을 180° 변조에 필요한 반파장 전압(V_π)과 3dB 대역폭(W_{3dB})으로 대표되며 전극의 전파 손실을 고려하지 않으면 아래와 같은 간단한 식을 이용 할 수 있다.^{[8][9]}

$$V_{\pi} = \frac{\lambda g}{n_o^2 r L} \quad (1)$$

$$W_{3dB} \approx \frac{c}{4 \Delta n L} \quad (2)$$

여기서 식 (1)에서 λ는 광의 파장, g는 전극간의 간격, r은 전기광학계수, L는 도파모드와 마이크로파 전기장간의 중첩지수, 광과 전기장의 상호작용 길이를 나타낸다. 그리고 Δn = |n_o - n_m|, n_o과 n_m은 폴리머의 광학적 굴절률과 마이크로파 굴절률을 의미하며 c는 진공중의 광속을 의미한다. 식 (1)에서 반파장 전압은 도파물질의 선형 및 비선형 광학적 특성 즉 굴절률(n_o), 전기광학 계수(r)에 의존하는 동시에 전극의 구조와 밀접한 관계가 있다. 즉 도파모드와 전기장의 중첩지수(L), 전극길이(L), 전극의 간격(g)에 의존한다. 반파장 전압(V_π)을 줄이기 위하여 전극의 길이(L)를 늘리면 총 광손실과 대역폭에서 손해를 보게 되며, 전극간격(g)을 지나치게 줄이면 도파모드는 전극과 접하게 된다. 이때 전극과 수직편파를 가지는 도파모드는 표면 플라즈몬(surface plasmon)효과 때문에 광손실이 증가한다. 따라서 전극구조의 최적화가 필요하다. 마이크로스트립 전극은 도파로에 균일한 마이크로파 전기장을 인가하기 때문에 동평면(coplanar) 전극구조보다 전파손실은 약간 크지만 중첩지수 측면에서는 2~3배 이득을 본다.^[3] 단일 푸시풀 전극을 이용하면 같은 전극길이에 대하여 반파장 전압(V_π)이 절반으로 줄어든다.

초고속 변조시 입력되는 마이크로파 신호의 감쇄는 무시할 수 없으며, 금속의 표피효과에 의해 지배

적으로 발생하며^[2] 주파수의 지승근에 비례하여 증가한다. 완벽한 속도정합과 전극의 마이크로파 손실이 없을 때 마하-젠더 광변조기의 출력광의 변조크기와 마이크로파 감쇄와 속도 부정합이 존재할 때 출력광의 변조크기의 비를 응답도(R)로 정의하면 다음과 같이 주어진다.^[4] 이때 단위는 [dB] 이다. 여기서 마하-젠더 간섭계의 동작점이 소신호(small signal) 입력에 대하여 선형 변조영역에 있다고 가정한다.

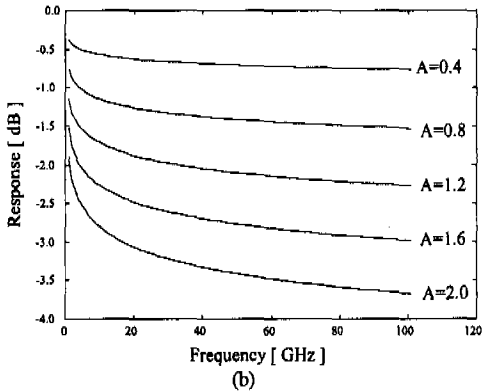
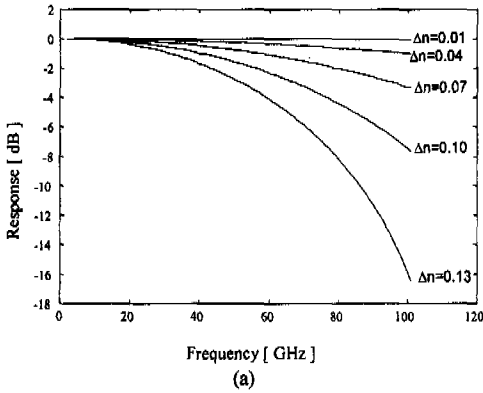


그림 1. (a) 다양한 굴절률 차이를 가지는 마하-젠더 광변조기의 주파수 응답(A=0으로 가정)
(b) 다양한 전파 손실을 가지는 마하-젠더 광변조기의 주파수 응답(Δn=0으로 가정)

Fig. 1. (a) Frequency response of the M-Z modulators with various index differences (Assuming A=0).
(b) Frequency response of the M-Z modulators with various propagation losses (Assuming Δn=0).

$$R = 10 \log \frac{e^{-2\alpha L} - 2e^{-\alpha L} \cos KL + 1}{\alpha^2 + K^2} \quad (3)$$

여기서 K와 α는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \frac{\Delta n v_m}{c}, \quad \alpha = \frac{A}{20} \ln 10 \sqrt{\nu}$$

여기서 $W_m = 2\pi f$, f는 주파수, A는 1 GHz에서 전극의 단위 길이당 전파손실(propagation loss)이다. 식 (3)은 전극의 길이, 굴절률 차이(Δn), 전극의 전파손실(A), 그리고 주파수(f)의 함수이다. 전극의 손실(A)과 굴절률 차이(Δn)의 크기에 따라 전형적인 폴리머 마하-젠더 광변조의 주파수 응답특성을 분석하여 아래 그림 1(a)와 (b)에 제시하였다. 이때 상호작용영역의 길이는 2cm 가정하였다.

그림 1의 결과로 볼 때 LiNbO₃와 같은 강유전체를 이용할 경우 속도정합이 고속 변조특성에 더 큰 영향을 미치지만 폴리머의 경우 전극의 전파손실만 충분히 작다면 100GHz 이상의 대역폭을 쉽게 얻을 수 있을 것으로 분석된다.

III. 진행파형 이중 마이크로스트립 전극 설계

1. 전극 구조 및 해석 방법

본 논문에서는 마하-젠더 광도파로에 마이크로파 전기장을 효과적으로 분포시키기 위한 이중 마이크로스트립 전극을 제안하였다. 즉 단일 마이크로파 전원을 Y 가지를 통해서 두개에 도파로에 변조신호를 인가하여 푸시풀 동작을 위한 전극구조이다. 특성 임피던스 정합을 위해 두개의 상부전극은 단일 마이크로스트립의 상부 전극폭보다 좁아져야 한다. 두 개의 대칭적 도파로는 푸시풀 폴링으로 부호가 다른 전기광학 계수를 가져야하며 동일한 변조신호를 인가받는다. 제안된 소자의 전체 구조는 그림 2과 같다.

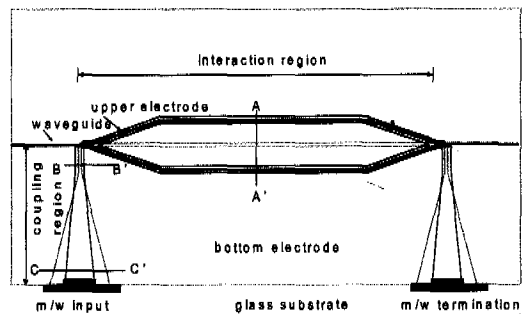


그림 2. 이중 마이크로스트립 전극을 가진 푸시풀 마하-젠더 광변조기 구조

Fig. 2. Schematic layout of the push-pull MZ modulator with the dual microstrip electrode.

전극은 마이크로파 전원과 결합하는 영역, 그리고 광도파로와 전극간의 상호작용 영역으로 나눌 수 있다. 이러한 전극은 유리 기판위에 형성된다고 가

정하였다. 입/출력측에는 마이크로파 커넥터(connector)와 연결하기 위하여 동평면 전극을 도입하였다. 하부전극은 폴링(poling)시 도파로에 서로 다른 방향으로 전기장을 인가하기 위하여 약간의 간격을 두고 분리되어 있다. 폴링 후 마이크로파 커넥터(connector)를 연결시 전기적으로 단락시킨다. 즉 제한된 전극으로 폴링과 광 변조시 모두 사용 할수 있으므로 제작공정이 단순화 된다.

전극의 특성을 찾는 방법으로 간단한 구조는 등각사상(conformal mapping)법을 이용하였으며, 다소 복잡한 구조에서는 유한요소법을 이용하였다. 이들 방법을 이용하여 전극의 각 영역에서 특성임피던스, 유효유전률, 전기장의 분포 등을 구하였다. 구형 단일 모드도파로를 도입하여 상호작용 영역에서 전극 구조를 비구어 가면서 도파모드와 전기장간의 중첩지수(overlap integral)를 구하였다. 유한요소법으로 해를 찾는 과정에서 매쉬(mesh)를 효과적으로 구성하는 것이 짧은 시간내에 정확한 해를 구하는데 가장 중요하다. 본 논문에서는 전기장 세기에 따라 상대적인 간격을 0.5, 1, 3으로 구분하여 가로방향으로 90개 세로 방향으로 60개의 매쉬를 형성한후 경계조건을 대입하여 해를 구하였다. 본 논문에서 Matlab 4.2c 버전을 이용하여 개발한 유한요소법을 정확한 답이 있는 전형적인 마이크로스트립 구조에 적용하여 해를 구한 결과 3%이내의 오차를 가졌다. 유한 요소법으로 Laplace 방정식의 해 즉 전극주위의 전위분포를 찾은 후 이를 공간미분하여 전기장의 분포를 구한다. Gauss 법칙을 이용하여 전극의 단위 길이당 정전용량을 구한 후 전극의 특성임피던스(Z_c)과 유효유전률(ϵ_{reff})을 계산한다 그 표현식은 아래와 같다.

$$Z_c = \frac{1}{c\sqrt{C_0 C_a}} \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = C_a / C_0 \quad (5)$$

여기서 c 는 광속, C_0 는 진공으로 채워졌을 때 단위 길이당 정전용량, C_a 는 실제전극 구조의 단위 길이당 정전용량 각각 나타낸다. 전극주위의 물질이 비자성체 이면 전극을 따라 진행되는 마이크로파속도(V_m)는 진공중의 광속을 유효유전률의 제곱근으로 나눈 값이다.

한편 중첩지수를 구하기 위해선 모드의 광전력 분포를 알아야 한다. 실제로 폴리머 도파로의 구조에 따라서 광전력 분포는 다소 차이가 있다. 본 논

문에서는 전극구조와 중첩지수와의 관계를 찾는 데 초점을 맞추었기 때문에 해석이 비교적 용이한 구형 도파로의 광전력 분포를 이용하였다.

2. 도파로와 전극의 상호작용 영역해석

그림 2에서 도파로와 전극이 만나는 상호작용 영역(interaction region)의 하부전극은 푸시풀(push-pull) 폴링(poling)을 위해 분리되어 있다. 즉 폴링시 두 하부 전극사이의 전위차를 동일한 두 개의 저항을 이용해서 절반으로 줄인 후 상부전극에 전위를 인가하면 하나의 고전압원으로 양쪽도파로에 반대방향의 전기장을 형성시킬 수 있다. 두 하부 전극사이의 간격은 강한 전기장에 의한 절연파괴가 발생하지 않도록 상하부 전극간격보다 두배 이상 넓어야 한다. 상호 작용영역의 단면(A-A')구조와 한 개의 전압원으로 푸시풀 폴링을 위한 전기회로의 배치를 그림 3에 나타내었다. 만일 펄스폴링(pulse poling)^[10] 기법 즉 하나의 고전압원을 이용하여 양쪽 도파로에 교대로 서로 반대인 폴링 전기장을 인가하는 방법을 이용하면 절연파괴 현상을 보완할 수 있다. 하지만 이 방법은 폴링으로 형성되는 전기광학 효과가 연속적인 dc 전기장을 인가하는 방법보다 작은 것으로 보고되었다.^[11]

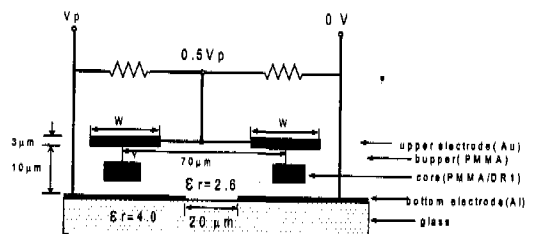


그림 3. 상호작용영역(A-A')의 단면 구조와 푸시풀 폴링회로

Fig. 3. Cross section of the interaction region (A-A') and push-pull poling circuit.

지금까지 보고된 소자의 폴리머 층의 두께는 10 µm 부근이었기 때문에 두 하부전극간의 간격을 20 µm로 설정하였다. 두 개의 상부전극간의 거리를 70µm로 설정하여 두 도파로의 모드 결합을 방지하고 폴링 전기장이 두 도파로에서 거의 대칭이 되도록 하였다. 상부전극의 두께를 3µm로 설정하여 전산모의 하였다. 그리고 도파모드의 크기와 상하부 전극간의 간격은 금속에 의한 광의 흡수손실과 구동전압을 고려하여 결정해야 한다. 마하-젠더 광변조기는 단일모드 도파로를 이용해야 변조효율이 높다. 폴리머를 이용하여 채널도파로(channel wave-

guide)를 제작하는 방법으로 O₂ RIE(Reactive Ion Etching)방법^[8], 광표백(photobleaching)방법^[12], UV 경화 에폭시의 감광특성을 이용한 방법^[13] 등이 알려져 있다. 전산모의에서 버퍼층으로 PMMA, 코어층으로 PMMA-DR1 손님주인계(guest-host system) 전기광학 폴리머의 광학 및 전기상수를 이용하였다. 코어(core)층의 굴절률은 1.51 버퍼(buffer)층의 굴절률은 1.48로 두 층간의 굴절률 차이를 0.03으로 가정하였다. 도파로의 굴절률차이는 광도파모드의 생김새와 관련이 있으며, 광파와 마이크로파의 속도 정합과는 무관하다. 가로길이(5μm)와 세로길이(4μm)인 구형 채널도파로(rectangular channel waveguide)를 해석에 도입하였다. 광변조에 이용될 파장 1.55μm TM 기본 모드의 생김새를 유효 굴절률 방법으로 구하여 그림 4에 제시하였다. TM 기본 모드의 생김새와 광섬유의 기본 모드의 생김새가 비슷할수록 패키징 과정에서 결합손실이 줄어든다. 그림 4의 결과를 고려하면 전극간의 간격을 10μm 가 적절하다.

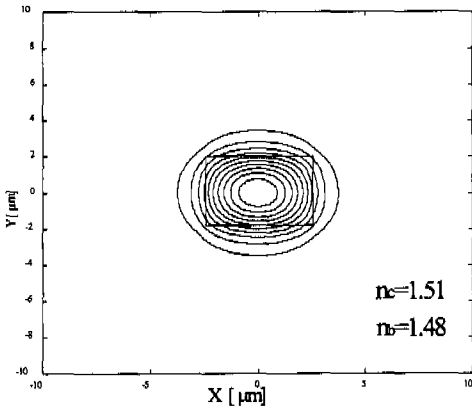


그림 4. 구형 도파로의 TM 기본모드 생김새
Fig. 4. TM fundamental mode profile of rectangular waveguide.

폴리머의 일종인 PMMA의 유전률은 2.6부근이다. 상부 전극의 폭(W)은 전극의 특성임피던스, 유효유전률 및 중첩지수에 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다. 상부전극의 폭을 변화시키면서 전형적인 단일 마이크로스트립 전극과 이중 마이크로스트립 전극의 특성임피던스(Z₀)와 유효유전률(ε_{eff})의 변화를 그림 5에 제시하였다. 단일 마이크로스트립 전극구조에서 상부전극의 폭 W가 24μm 일때 특성임피던스 50Ω을 만족하였고 이중 마이크로스트립은 5μm 에서 50Ω 시스템과 임피던스 정합조건

을 만족하였다. 전극의 유효유전률은 상부전극의 폭이 넓을수록 점점 증가하였고 이때 광파 마이크로파 굴절률 차이(Δn)는 전극구조와 관계없이 0.05이하로 나타났다.

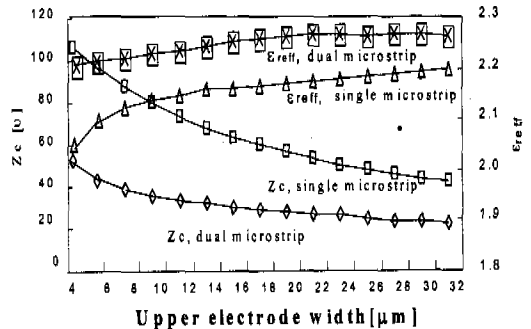


그림 5. 상부전극의 폭에 대한 특성임피던스 및 유효유전률 변화
Fig. 5. Characteristic impedance and effective dielectric constant as a function of upper electrode width.

그림 4의 결과와 변조신호를 인가시 전극양단에 형성된 전기장을 이용하여 중첩지수(overlap integral)를 구하였다. TM 기본 모드와 변조신호의 전기장간의 중첩지수는 다음과 같이 주어진다.^[5]

$$\Gamma = \frac{\int \int E_{11}^2(x, y) E_m(x, y) F(x, y) dx dy}{\int \int E_{11}^2(x, y) dx dy} \quad (6)$$

여기서 E₁₁²(x, y)는 TM 기본모드의 광 전력분포, E_m(x, y)는 변조전기장의 분포 그리고 F(x, y)는 전기광학 계수 분포이다. 변조신호의 전기장 분포는 유한요소법으로 구하고 전기광학 계수의 분포는 풀링 시 인가되는 dc 전기장의 방향과 세기에 의해서 결정된다. 풀링 전기장이 공간상에서 일정하다고 가정하면 F(x, y)는 전기광학 폴리머 물질의 단면 분포로 대치할 수 있다. 여기서는 도파로의 구조는 일정하게 놓고 상부전극의 폭의 변화에 따른 중첩지수의 변화를 계산하였다. 그 결과는 그림 6에 나타나있다. 중첩지수는 상부전극의 폭이 4μm 일 때 0.74, 8μm 이상이 되면 0.84부근에서 수렴된다. 중첩지수를 극대화 하는 방안으로 클래딩 물질을 전기광학 폴리머로 대치하는 기법도 이용할 수 있을 것으로 보인다. 즉 전기광학 폴리머의 굴절률은 물질내의 비선형 쌍극자의 농도로써 조절이 가능하기 때문이다. 그리고 코어층에 잘 간혀진 도파모드는 많은 광전력이 변조효과에 기여하므로 약하게 간혀진 경우보다 더 큰 중첩지수를 가지게 된다.

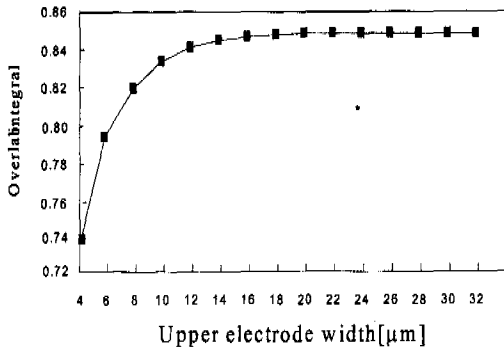


그림 6. 상부전극의 폭에 따른 중첩지수
Fig. 6. Overlap integral as a function of upper electrode width.

임피던스 정합을 만족하는 전극폭은 5μm로서 이때 중첩지수는 도파로 단면에 균일한 전기장 분포를 갖지 못하기 때문에 전극폭이 충분히 넓은 때 보다 7%정도 작다. 실제 소자제작 환경을 고려하면 전극폭이 도파로 폭 보다 넓은 것이 도파로와 전극의 정렬에 용이하다. 그래서 전극 제작시 이중 마이크로스트립 구조에서 상부전극의 폭을 8μm로 설정하였다. 단일 임피던스 정합을 최우선적으로 고려하면 전극폭과 도파로 폭이 거의 일치할 때 가장 양호한 특성을 가지므로 상부전극을 자기정렬형 도파로의 마스크로 이용할 수 있을 것으로 예측된다.

3. 마이크로파 결합영역 설계

그림 2에서 도파로에 결합된 폭이 매우 좁은 마이크로스트립 전극에 50ohm 임피던스를 가지는 마이크로파 커넥터를 통하여 변조신호를 인가하기 위해서는 상부전극의 폭이 넓은 동평면 전극구조에서 폭이 좁은 마이크로스트립 전극구조로 변환되는 영역이 필요하다. 그림 2에서 SMA 커넥터와 연결된 부분(C-C')과 마이크로스트립 전극 시작부분(B-B')을 해석하였다. SMA 커넥터와 연결되는 부분에서 유전층의 두께는 상부전극의 폭(s)와 두 전극간의 간격(g)에 비해 매우 작기 때문에 전극을 동평면 구조로 간략화하여 그림 7에 보여주고 있다.

특성임피던스가 50Ω이 되기 위한 상부전극 s와 전극간의 간격g는 800μm와 100μm로 설계하였다. 폭s는 SMA 커넥터와 접합을 위해 충분히 넓게 설계하였다. 한편 그림 2에서 결합영역의 끝(B-B')에서 마이크로 스트립 전극의 시작부분의 단면구조는 그림 8과 같다.

그림 8과 같은 전극구조에서 상부전극의 폭에 따른 특성임피던스와 유효유전률을 그림 9에 제시하

였다. 상부전극의 폭이 28μm 일때 임피던스 정합 조건을 만족하였고, 실제 제작시 패턴은 30μm로 설정하였다.

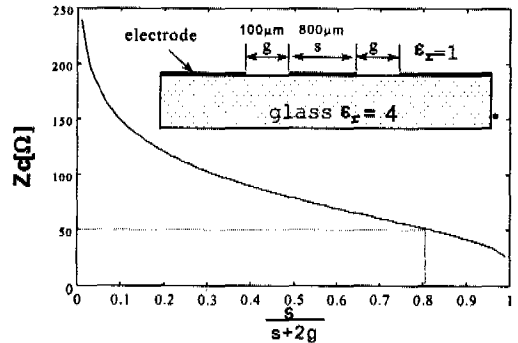


그림 7. 동평면 전극의 기하학적 구조에 따른 특성임피던스의 변화
Fig. 7. Dependence of characteristic impedance of coplanar electrode on the geometrical structure.

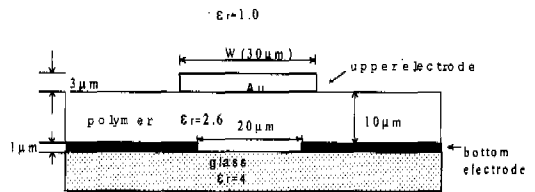


그림 8. 마이크로파 결합영역의 끝(B-B')의 단면
Fig. 8. Cross section of end (B-B') of the microwave coupling region.

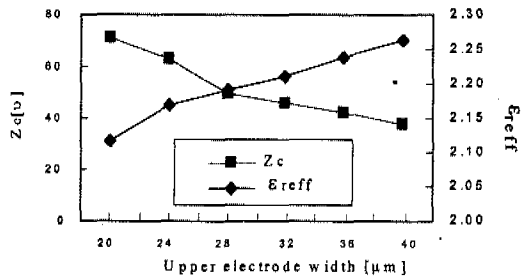


그림 9. 마이크로파 결합영역 끝의 전극특성
Fig. 9. Electrode properties at the end of microwave coupling region.

IV. 전극제작 및 특성 측정

지금까지 설계된 수치를 근거로 하여 폴리머 마하젠더 광변조기용 전극을 제작하였다. 먼저 유리 기판위에 알루미늄을 1μm 두께로 열증착하였다. 포토리소그래피 공정으로 하부전극패턴을 형성시킨

다. 본 논문에서는 전극 특성 연구에 초점을 맞추었기 때문에 도파로 제조공정은 생략하였다. PMMA가 금속과 접착성이 나쁘기 때문에 두께가 1 μ m인 음성포토레지스터(Nega PR)를 유리기판위에 스핀코팅 후 PMMA를 8 μ m를 코팅하였다. 즉 하부전극 위에 음성포토레지스터를 2000rpm으로 스팀코팅한 후 140 $^{\circ}$ C에서 20분간 열경화시킨다. 그 위에 사이클로헥시논에 20wt%로 녹인 PMMA를 2000rpm으로 코팅시킨다. 이때 두께는 4 μ m 정도가 되며 이러한 과정을 두번 반복한다. 한번 PMMA코팅을 끝낼 때 마다 90 $^{\circ}$ C에서 4시간 이상 가열하여 용매를 제거한다. 마지막으로 음성포토레지스터를 코팅한 후 경화시킨다. 상부전극은 수 μ m 정도의 두께를 가져야하기 때문에 도금공정이 필요하다. 먼저 금을 500 \AA 정도로 열증착한 후 양성포토레지스터(Posi PR)의 일종인 AZ4562를 3500rpm으로 금박막위에 코팅하고 포토 리소그라피 과정으로 전극패턴을 형성시킨다. AZ4562는 점도가 매우 높기 때문에 5 μ m 정도로 두껍게 코팅된다. 스핀 코팅된 시료를 90 $^{\circ}$ C에서 20분간 가열하고, 마스크 정렬기를 이용하여 하부 전극패턴과 정렬한 뒤에, UV광원을 2분 동안 노광하고, MIF 300현상액에 약 7분 동안 담구면 도금용 패턴이 형성된다. 전기 도금과정은 전극 제작 공정에서 전극의 특성을 결정짓는 매우 중요한 과정이다. 전기 도금으로 석출되는 금표면의 상태는 도금용액의 온도, 인가되는 전류밀도등에 크게 영향을 받는다. 실제로 상부전극의 표면적이 아주 작기 때문에 전기도금시 전류량을 제어하기 힘들다. 따라서 도금되는 면적을 1cm²가 되도록 전극 패턴과 관계없는 도금패턴을 추가하였다. 금이 리터당 8g이 녹아있는 도금용액을 온도 60 $^{\circ}$ C, 전류밀도 4mA/cm²으로 설정하여 도금을 수행하였다. 도금 장치는 성금포밍사의 SW/PM2 장치들을 사용하였다. 이러한 조건에서 석출되는 도금 두께는 분당 0.2 μ m였다. 도금시간을 약 20분 정도 수행한 후 AZ4562를 스트립퍼로 제거한다. 도금을 너무 오랫동안 수행하면 포토레지스터 패턴이 전디지 못한다. 마지막 단계로 소자를 50 $^{\circ}$ C 금 식각용액(KI: I₂: H₂O = 4 : 1 : 40)에 10초 정도 담구면 도금된 부분만 남고 증착된 부분은 식각되어 전극패턴이 완성된다.

전극의 특성을 측정하기 위한 알루미늄 지그를 제작하였다. 마이크로파 입력단과 연결될 부분의 뒷면에 다이아몬드 절단기로 홈을 내어 클리빙(cleaving)한다. 두개의 하부전극을 실버페이스터를

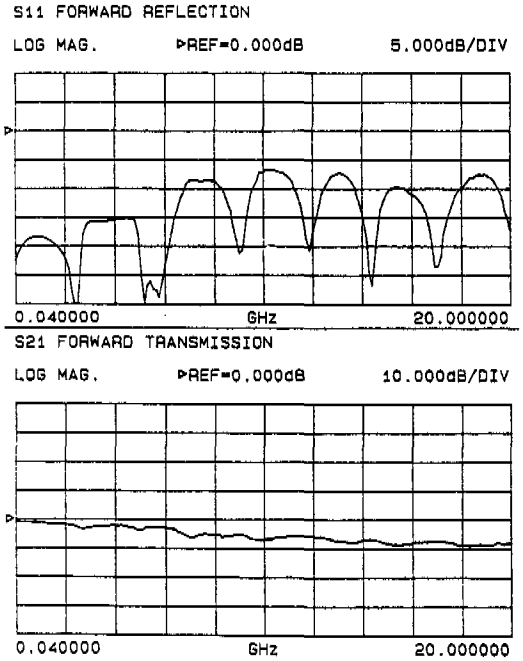


그림 10. 이중 마이크로스트립 전극의 마이크로파 특성
Fig. 10. The microwave characteristics of the dual microstrip electrode.

이용하여 알루미늄지그와 연결시킨다. 입출력측의 동평면 전극과 SMA 커넥터의 내부 도체와 연결시킨다. 폴리머층이 높은 열에 의해 파괴되기 때문에 상부전극과 SMA 커넥터의 내부도체를 남뎀으로는 연결하기가 힘들었으며, 적당한 압력으로 두 도체를 전기적으로 연결하는 방법을 이용하였다. 상부전극의 dc 저항은 5.2 Ω 이었다. 전극의 마이크로파 특성을 WILLTRON 사의 360B 회로망 분석기로 측정하였다. 입력단의 되돌림 손실(return loss)은 S₁₁, 입출력간의 총손실은 S₂₁으로 표시된다. 측정된 결과를 그림 10에 제시하였다. 전극의 S₁₁은 20GHz까지 최대 -6.5 dB로 나타났다. 이 결과는 상부전극 폭이 8 μ m로서 실제 임피던스 정합을 위한 폭보다 약간 넓기 때문에 발생하는 현상으로 보인다. 입출력간 총손실은 20GHz에서 -8dB로 나타났다. 전극길이는 2.5cm로서 전극의 전파 손실은 약 0.71 dB/(cm $\sqrt{\text{GHz}}$)로 나타났다. 전극의 전파손실은 금속의 표피효과에 의한 전도손실(conduct loss)과 유전체에 의한 흡수 손실(absorption loss)로 나누어지며 전극 구조에 따라 그 손실의 크기에는 차이가 있다.^[7] 이 수치는 기존에 보고된 단일 마이크로스트립 전극의 손실과 비슷한 수치이다. 따라서 본 논문에서 제안된 이중 마이크로스트립 전극을 마하-젠더 광변조기

에 이용하면 푸시폴 변조가 가능하기 때문에 소자의 구동전압과 대역폭을 개선하는데 이용 될 수 있을 것으로 예측된다.

V. 결론

폴리머 마하-젠더 광변조기의 푸시폴 변조효과를 이용하여 반파장전압, 대역폭 등을 개선하기 위한 이중 마이크로스트립 전극을 제안하였다. 제안된 구조의 전극으로 폴링도 가능하기 때문에 소자제조 공정이 단순하다. 유한요소법으로 임피던스정합, 속도정합을 만족하는 전극구조를 설계하였으며, 광파와 마이크로파간의 중첩지수를 구하였다. 전산모의를 통해 분석한 결과 이중 마이크로스트립 전극의 폭이 전형적인 단일 모드 도파로폭과 비슷할 때 임피던스 정합을 만족하였고, 전극폭이 다소 변해도 속도정합은 잘 만족하였다. 이 결과는 전극 패턴과 도파로 패턴을 자기정렬 방식으로 제작 할수 있음을 의미한다. 전극폭에 따른 광파와 마이크로파 전기장간의 중첩지수는 상부 전극의 폭이 8μm 이상이 되면 일정하게 유지되었다. 제안된 전극의 이용 가능성을 실험적으로 검증하기 위하여 포토리소그라피와 도금 등의 주요공정을 거쳐 제작하였다. 제작된 전극의 되돌림 손실(return loss)는 20 GHz 까지 -6.5dB 이하였고, 전극의 전파 손실은 0.71 dB/cm√√를 나타내었다. 이러한 특성으로 볼 때 이중 마이크로스트립 전극은 기존의 제작공정으로도 쉽게 구현할 수 있으며, 마이크로파 영역까지 마하-젠더 광변조기의 성능 개선에 이용할 수 있다.

참고 문헌

[1] K. Noguchi, O. Mitomi, K. Kawano, and M. Yanagibashi, "Highly Efficient 40-GHz Bandwidth Ti:LiNbO3 Optical Modulator Employing Ridge Structure," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, Vol. 5, No.1, pp.52-54, January, 1993.

[2] Hiroshi Haga, Masayuki Izutsu, and Tadasu Sueta, "LiNbO3 Traveling-Wave Light Modulator/Switch with an Etched Groove," *IEEE J. of Quantum Electronics*, Vol. QE-22, No. 6, pp.902-906, June, 1986.

[3] Eric R. Hedin and Frederick J. Geotz,

"Experimental studies of electro-optic polymer modulators and waveguides," *Applied optics*, Vol. 34, No. 9, pp. 1554-1561 March 1995.

[4] C. C. Teng, "Traveling-wave polymeric optical intensity modulator with more than 40GHz of 3-dB electrical bandwidth," *Applied Phys. Lett.* Vol. 60, No. 30, pp. 1538-1540, March, 1992.

[5] Y. Shuto, S. Tomaru, M. Hikita, and M.Amano, "Optical Intensity modulators Using Diazo-Dye-Substituted Polymer Channel Waveguides," *IEEE J. of Quantum Electron.* Vol. 31, No. 8, pp. 1451-1460, August, 1995.

[6] Lawrence A. Hornak, *Polymers for Lightwave and Integrated Optics: Technology and Applications* Marcel Dekker, Inc. pp287-363, 1992.

[7] K. C. Gupta, Ramesh Garg, and I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House Inc., pp. 1-104, 1979.

[8] W. Wang, D. Chen, H. R. Fetterman, Y. Shi, E. H. Steier, and L. R. Dalton, "Travel wave electro-optic phase modulator using cross-linked nonlinear optical polymer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, No. 8, pp. 929-931, August, 1994.

[9] W. Wang, D. Chen, H. R. Fetterman, Y. Shi, E. H. Steier, and L. R. Dalton, "40Ghz polymwe Electrooptic phase modulator," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, Vol. 7, No. 6, pp. 638-640, June, 1995.

[10] Thomas A. Tumolillo, and Paul R. Ashley, "A Novel pulse-poling technique for EO polymer waveguide devices using device electrode poling," *IEEE Photonics Tech. Lett.* Vol. 4, No. 2, pp.142-145, February, 1992.

[11] F. Michelotti, E. Toussaere, R. Levenson, j. Liang, and J. Zyaa, "Real-time pole and probe assessment of orientational processes in electro-optic polymers", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 67, No. 6, pp.2765-2767, November,

1995.

- [12] K. B. Rochford, R. Zanoni, Q. Gong, and G. I. Stegeman, "Fabrication of integrated optical structures in polydiacetylene films by irreversible photoinduced bleaching," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, pp. 1161-1163, 1989.
- [13] P. R. Ashley, T. A. Tumoillo, "Chennel waveguides in electro-optic polymers using a photopolymer clading technique," *Appl. phys. Lett.*, Vol. 58, pp.884-886, 1991.

김 광택(Kwang Taek Kim)

정회원



1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1991년 3월~1995년 5월 포항 방사광 가속기 연구소

1994년 3월~현재 : 현재 경북대학교 대학원 박사과정

김 성국(Sung Kuk Kim)

정회원



1985년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1991년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

1995년 9월~현재 : 안동정보대학 전자정보 통신과 전임교수

이 소영(Soo Young Lee)

정회원



1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1992년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1996년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 박사과정

송 재원(Jae Woon Song)

정회원



1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1980년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1984년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1984년 8월~현재 : 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수

강 신원(Shin Won Kang)

정회원

1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1980년 8월 : 영남대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1983년~1988년 : (주)국제 컴퓨터 엔지니어링
 1989년 4월~1993년 7월 : 일본 게이오 대학 대학원 (공학박사)
 1994년 3월~현재 : 경북대학교 센서공학과 전임강사