

광변조기용 CPW 진행파형 電極 마이크로파 傳送特性

논 문
9-1-8

Microwave Transmission Characteristics of CPW Traveling-wave Electrode for Light Intensity Modulator

김 성 구*, 윤 형 도*, 윤 대 원*, 유 용 텍**

(Seong Ku Kim, Hyung Do Yoon, Dae Won Yoon, Yong Tek Yoo)

Abstract

This report describes thick traveling-wave electrode formation and microwave transmission characteristics of the fabricated electrodes. Effective refractive indices of the microwave in the 5 micron CPW type traveling-wave electrodes is around 2.45 according to the results of time domain S parameter measurements. The bandwidth of the electrodes is about 10 GHz and could be extended to 15 GHz through optimization of the process. The developed process technique that enables plating of micropatterns upto 20 micron can be applied to broadband optical intensity modulators.

Key Words(중요용어) : Modulator(변조기), Electro-plating(전기도금), Velocity matching(속도정합), Characteristic impedance(특성 인피던스), S-parameter(S-파라미터)

1. 서 론

Ti:LiNbO₃ 변조기는 multigigabit long-haul transmission system, optical amplifier system 및 coherent system을 포괄하는 advanced optical transmission experiment에서 이용되는 광전부품이다. 이러한 시스템에서 요구되는 소자는 광대역 이면서 faster bit rate, low-chirp optical signal을 수용할 수 있는 변조기가 요구되고 있으며, 소자의 변조대역폭은 주로 마이크로파 및 광파간 전송 특성 감쇠(decay)와 속도부정합에 따라 달라진다¹⁾.

전기광학 특성이 우수한 재료인 LiNbO₃, LiTaO₃에 Ti 확산으로 제작된 광도파로를 이용해서 다양한 광변조집적소자가 연구, 발표되고 있으며, 특히 CPW (coplanar waveguide), ACPS (asymmetric coplanar strip)와 같은 진행파형 전극구조를 Mach-Zehnder 간섭계 및 방향성 결합기 (directional coupler)에 이용할 경우 고능률, 광대역 변조기를 제작할 수 있다²⁾.

본 연구에서는 이미 설계한바 있는³⁾ 진행파형 광변조기용 CPW 전극을 제작하고, 그 전극특성을 평가하였다. 특히 photo-resist를 double coating하면 두께가 20 μ m 이상인 역사리폴형 전극을 형성할 수 있는 미세패턴 전기도금 방법을 확립하였으며 이 기술은 전극의 마이크로파 유효굴절율을 감소시켜, 광파와 속도부정합을 개선시킬 수 있을 것이다.

II. 시편 제작과 패키징

Ti 확산도파로 소자는 전극과 전극사이에 전계를 인가할 경우 LiNbO₃ 결정표면 또는 버퍼층에서 전하가 이동하여 도파로에 인가된 실효전계가 감소하는데, 결정에 결함이 없는 경우 이러한 현상은 치밀한 버퍼층 형성으로 어느정도 보상할 수 있다. 또한 금속전극은 광전계에 손실을 발생시킴으로 도파로와 금속전극간에 low-index 유전버퍼층을 형성시켜 그 손실을 감소시킬 수 있다⁴⁾.

기관세척은 세척 전용용매인 Deconex속에서 초음파 세척하고, 초순수 및 이소프로필알콜에서 각각 초음파세척하여 준비하였고, PECVD 장비를 이용하여 그 기관위에 SiO₂ 를 5, 10, 15, 20 μ m 두께로 증착하여 버퍼층 두께의 영향을 고려하도록 배

* : 전자부품종합기술연구소 광전부품연구팀

** : 전남대학교 전자공학과

접수일자 : 1995년 7월 10일

심사완료 : 1995년 10월 12일

려하였다. 또한 스퍼터링으로도 버퍼층을 제작하였는데, 초기진공도 6×10^{-7} torr, Ar 개스를 약 30sccm, 기판온도를 상온으로 하여 공정진공도 약 5×10^{-3} torr로 요구되는 두께를 증착하였고, 증착율은 대략적으로 25 Å/min 이었다. 그리고 기판온도를 상승시키면 좀 더 치밀한 막을 형성할 수 있다. PECVD에 의한 실리콘산화막 형성은 다음 표 1과 같은 조건으로 성막하였다.

버퍼층 구조를 변경하여 소자의 성능을 향상시킬 수 있는데 D.C. 드리프트를 방지하기 위해서 저항율이 높은 산화막을 아래층으로 하고 초전효과로 인한 열드리프트를 방지하기 위해서 고저항 실리콘 산화막위에 저항율이 낮은 실리콘 산화막을 형성하는 방법이다⁷⁾. 이와같은 개념은 차후 소자 제작에 응용할 계획을 가지고 있으며 우선은 단일 실리콘산화막으로 전극을 형성하여 측정하였다.

표 1. PECVD 에 의한 실리콘 산화막 형성

Table 1. SiO₂ formation by PECVD

Process parameter		
Gas	N ₂ O	1420 SCCM
	SiH ₄	160 SCCM
	N ₂	240 SCCM
Chamber pressure	base	0 mtorr
	process	800 mtorr
APC angle		0 degree
RF power	forward power	10 watts
	reflected power	0 watts
	load position	50 watts
	tune position	50 watts
Process temperature		310 °C

LiNbO₃ 변조기에 있어서 전극도체 손실감소 및 속도부정합을 개선시키기 위해서 1 μm 보다 두꺼운 SiO₂ 층과 10 μm 이상의 두꺼운 도금전극의 조합으로 달성가능하다는 점은 이미보고되고 있으며 기판위에 차폐전극(shielded plane)을 두꺼운 전극과 함께 사용하기도 한다⁹⁾. 그러나 이와 같은 속도정합을 달성하려는 노력은 소자 임피던스를 더욱 낮추는 결과를 초래하게 된다. 이는 다시 drive power을 증대시키고 50Ω 외부 구동원과 임피던스 부정합을 유발하게 된다. 이러한 임피던스감소는 두꺼운버퍼층을 사용함과 동시에 중앙도체와 접지도체간의 큰 간격(약 13-15μm)을 설계하여 부분적으로 보상을 받을 수 있다. 이들 모두가 임피던스를 높이는데 도움을 줄 수 있지만 역시 구동전압을 상승시킨다. 본 연구에서 제작한 전극의 구조는

CPW 진행파형 전극구조이고 중앙도체 폭은 10μm, 접지도체간 간격은 13μm 이다. 그리고 전극길이 즉, 상호작용길이는 18과 15mm로 하였다. 표 2에 도금할때 사용되는 photo-resist 두께를 나타내었다.

표 2. 전극형성용 photo-resist

Table 2. Photo-resist thickness for electrode formation

spin rpm	coating acc	mode sec	exposure sec	soft & hard bake			thickness A
				min	min	min	
3000	1000	20	proximity vacuum contact	30	30	no	190,009
				35	30	30	173,200
3000	1000	40	manual	40	30	no	132,669
				40	40	no	150,000
				30	30	no	150,824
				34	30	no	91,000
6000	1000	20	manual	30	30	no	92,439
				50	40	no	90,816
				30	40	no	92,500
				34	30	no	73,350
6000	1000	30	vacuum contact	35	30	30	73,684
				30	30	30	74,448
				35	30	30	
				35	30	30	

† soft bake : 90°C
hard bake : 110°C

금속과 버퍼층간의 고착력을 높이기 위해서, 얇은 두께의 Cr 또는 NiCr을 수백 Å 먼저 증착한다. 그리고 Au를 1000Å 정도 증착한다. 전극두께 관점에서 속도정합을 이룩하려면, 먼저 두꺼운 전극을 사용해야한다. 더욱 속도정합을 달성하기 위해서 전극구조를 약간변경한 일명 novel structure electrode에 관해서 보고된바 있다⁷⁾. 이러한 구조는 역사다리꼴 모양의 전극구조를 하고 있다. 이러한 두꺼운 전극형성은 사다리꼴형 photo-resist를 사용하고 표 2에 나타낸 바와 같다. 두꺼운 사다리꼴 전극을 형성하기 위해서 두꺼운 photo-resist를 guide로하여 형성하고, 그리고 마이크로파 유효굴절율 및 구동전압을 FEM을 사용하여 계산하고 분석하였다. 마이크로파 유효굴절율은 수직출출부 X가 증대함에 따라서 감소한다. X 값이 어느정도가 되면 유효굴절율은 광파에 의한 굴절율과 일치한다. 그렇지만 구동전압은 출출부 X와 함께 변화하지 않으며 일정하다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 사다리꼴 전극 패턴은 기존의 rectangular pattern보다도 더 나은 속도정합

결과를 가져올 것이며 이로 인해 대역폭 향상이 기대된다는 점이다. 그러나 특성임피던스가 돌출부 X와 함께 감소한다. 따라서 변조대역폭만을 고려할 경우, 임피던스부정합을 감수한다면 사다리꼴 전극을 설계하면 된다. 본 연구에서도 이러한 형상의 패턴을 형성하였고 그 가능성을 보았다.

전기 도금에 의한 전극형성을 위해서, 10 liter 용 도금조를 제작하고 도금전극간격을 고려한 테프론 지그를 설계하여 이용하였다. 먼저 1 liter 용 욕조를 준비하고 또 다른 소형 테프론 지그를 이용하여 적절한 도금조 PH, photo-resist가 가장 오래건디는 욕조온도, 시간 및 도금거리등 제반조건을 면밀히 분석한 후 이것에서 얻은 최적조건을 가지고 실제 소자제작에 응용하였다. 본 연구에서 응용한 금도금용 initial concentrate 용매에 Potassium Gold Cyanide $KAu(CN)_2$ 를 용해시켜 도금액을 조성하였다. 먼저 test 용 도금액은 initial concentrate 용액 500ml에 de-ionized water 300ml을 섞고 PGC 17.64g(Au 12g)을 적정온도에서 완전히 녹인후 de-ionized water를 넣고 1 l로 만들면 된다. 제조된 금도금액의 pH를 측정해본 결과 욕조온도 43℃ 에서 약 pH 8.2를 나타내었다. 금도금시 이 수치는 대단히 중요하다. 본 연구에서 사용한 금도금 guide는 photo-resist로서 강중성 및 염기성에서는 적절한 금도금 두께가 형성되기도 전에 PR에 attack를 받아 심각한 damage를 입게된다.

Au 표면에 PR을 spin 코팅할때 HMDS (hexamethyldisilazane)를 적당량 먼저 스핀코팅하면 기판과 PR이 고착력이 증대한다. 그렇지 않는 경우 도금액 속에서 1분정도 지나면 PR이 떨어져 나가는 현상이 발생됨으로 주의해야한다. 그림 1에 전극제작을 위한 전체 공정도를 나타내었다.

금박리제로 사용한 박리제의 액조성 방법은 먼저 1.8 liter의 탈이온수에 염혼합물 36g을 넣고 온도를 약간 올리면서(45℃) 교반하여 완전히 용해시킨다. 이때 청화칼륨(KCN) 18g을 첨가하고 동시에 용해시킨 다음 상온에서 금 에칭에 이용하였다.

그림 2는 본 연구에서 제작한 도금전극 전체형상이며 다이아몬드 톱을 사용하여 날개로 자른 개별소자도 함께 나타내었다. 그림 3는 측정을 위해 패키징한 변조기이며, 그림 4는 실험 진행 중 가장 높은 두께를 갖는 전극의 두께형상이고, 그림 5은 전극을 부분부분 확대한 사진이다.

전극특성은 Network Analyzer(Hewlett packard 8510)로 분석하였다.

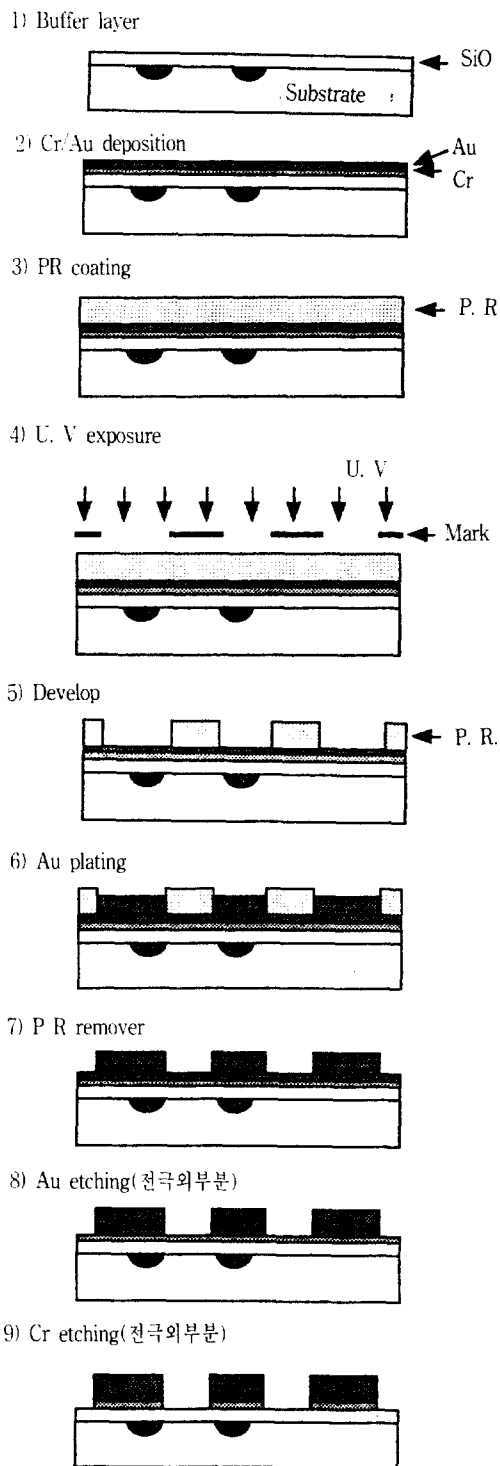


그림 1. 전극제작 공정도

Fig. 1. Process chart of electrode formation

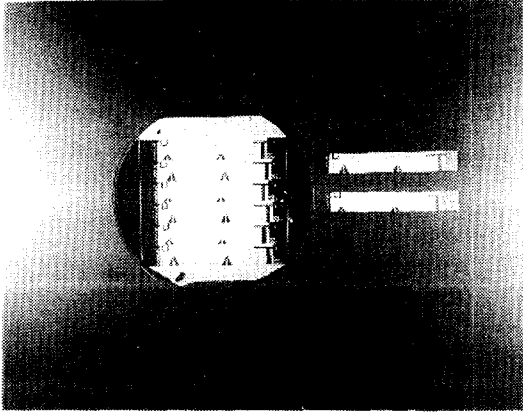


그림 2. 도금전극과 그 개별소자
Fig. 2. Electro-plating electrode and each device

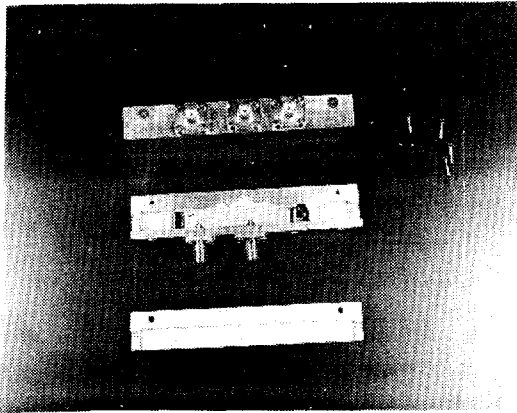


그림 3. 측정용 변조기 패키지
Fig. 3. Modulator package for measuring

III. 결과 및 고찰

일반적으로 전송특성 감쇠(decay)는 다음 두가지 인자를 포함하고 있는데, 그것은 감쇠곡선에서 나타나는 완만한 감소와 급격한 침하이다. 속도정합된 광변조기가 제작되었다 할지라도 이러한 침하는 그대로 남게되며 변조기의 대역특성에 영향을 미친다.

내부칩 크기를 변경하여 전송특성을 개선시킬 수 있는 방법에 대해서 보고된 문헌에 의하면 내부칩 길이, 전극길이, 칩폭 그리고 내부칩 두께등을 변화시키면서 마이크로파 전송특성을 계산하였다. 그 결과 내부칩 폭과 두께를 제외하면, 나머지 변수는 감쇠특성에 별다른 영향을 미치지 않는다¹⁾.

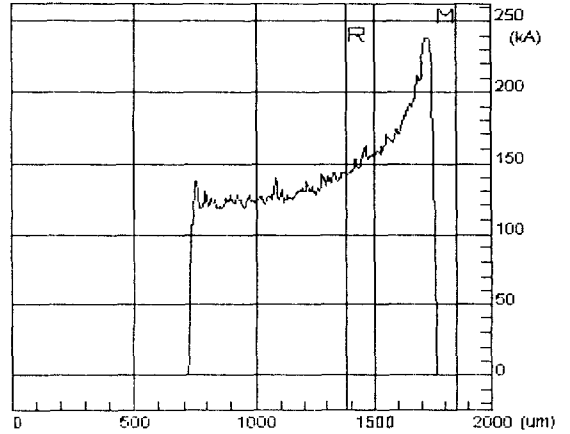


그림 4. 가장 두꺼운 전극두께 profile(약 13µm)
Fig. 4. Thickest electrode profile(about 13µm)

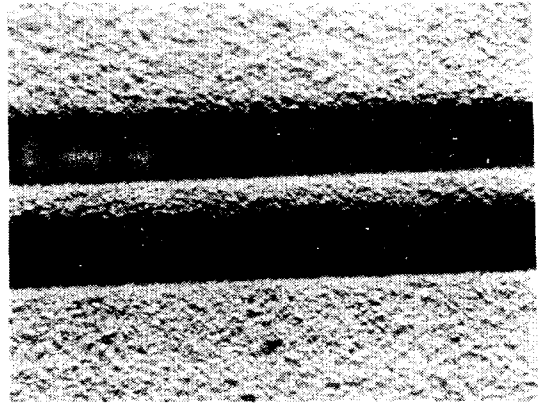


그림 5. 중앙전극과 접지전극간 금도금(×1000)
Fig. 5. Electro-plating between center and ground electrode(×1000)

마이크로파 유효굴절율 n_m 은 Network Analyzer의 time-domain reflectometer 로 측정하였다. 삽입손실 S_{21} 는 구동원과 부하간에 전송선로(또는 4단자망)를 삽입했을때 손실정도를 나타내며, E_R/E_R 로 정의된다. 일반적으로 삽입손실은 dB로 표현하며 다음과 같다²⁾.

$$|S_{21}| = 8.686 \alpha l - 20 \log |1 - \Gamma^2| + 20 \log |1 - \Gamma^2 e^{-2\gamma l}| \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{Z_g - Z}{Z_g + Z} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(j\omega C)} \quad (3)$$

여기서 γ 는 복소전달상수이고 l 은 전극길이이다. 저주파 부근에서는 전극두께 t 가 표피길이 δ 즉, $t \leq \delta$ 이기 때문에 incremental inductance rule을 적용할 수 없으나, $t \ll w$ 라고 가정하고 중앙도체만을 고려하여 R 을 계산할 수 있으며, 일반적으로 같은 dimension인 bulk gold resistivity와 같다.

$$R = Re \left[\frac{\chi \rho}{2w} \frac{\cos \xi \cosh \xi + j \sinh \xi}{\cos \xi \sinh \xi + j \sin \xi \cosh \xi} \right] \quad (4)$$

$$\xi = \frac{t}{2\delta} \quad (5)$$

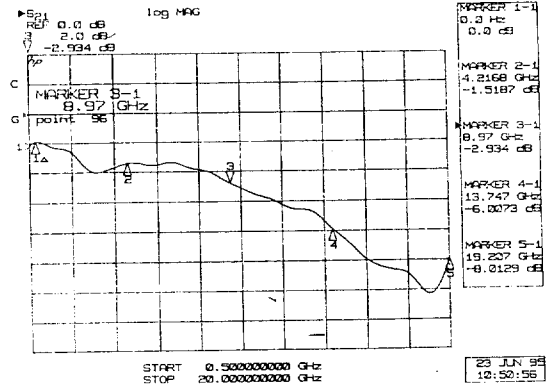
$$\chi = \frac{1}{\delta} (1 + j) \quad (6)$$

저주파 부근에서 attenuation factor는 $R \ll wL$ 일 때의 매우 낮은 주파수를 고려하지 않는다면 주파수 의존성은 무시할 수 있다. 고주파 부근에서, attenuation factor는 주파수 \sqrt{f} 에 비례하게 된다⁹⁾.

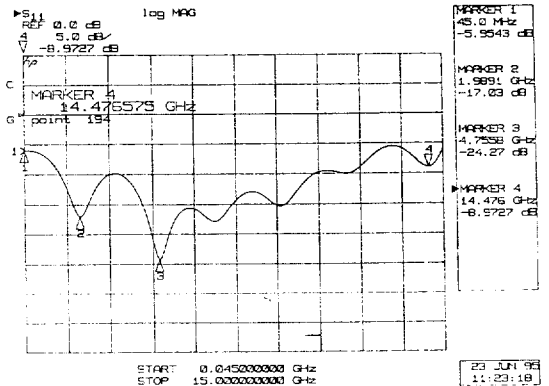
그림 6, 7에 전극두께 $5\mu m$ 인 시편 1, 2의 마이크로파 전송특성을 나타내고 있다. S_{11} 은 이상적인 경우, 주파수가 증가하더라도 일정한 크기를 가지고 위상만 변화하는 스미스 차트위에 원을 그려야 한다. 그러나 주파수가 증가하면서 스미스 차트상의 원이 커져, 주파수 증가가 CPW 전극의 임피던스 변화를 하는 원인이 되고 있음을 예상할 수 있다. 특정주파수에서 곡선이 꼬이거나 하는 것은 전극제작 공정상에 전극간 에칭 불완전, 불균일한 전극, 급격히 격인 전극끝단에 임피던스 부정합에 의한 반사등에 의한 전극자체의 자기공진이라고 생각된다.

그림 7은 시편 2의 S-parameter 특성을 간략히 나타내었다. 가장 낮은 주파수 강하는 140GHz에서 관측되었고, 급작한 주파수 침하는 90GHz 전후부터 시작되고 있다. 일반적으로 내부침폭이 작아지면 마이크로파 전송특성이 광대역화 되는데, 이러한 특성이 암시하는 바는 더 넓은 대역폭을 갖게 해준다는데 있다. 실제로 내부침 폭을 절단해가며 조사하면 특성이 개선된다. 그러나 본 실험에서 사용하는 전극 dimension은 큰 편이고, 긴 전극을 갖고 있음으로 상당한 제약요인 발생하리라는 것을 알 수 있다. 높은쪽의 주파수에서 전체적인 반사가 생기는 이유는 Network Analyzer 자체에서 calibration 후에 존재하는 불안정한 요소도 한몫하는 것으로 사료된다.

또한, 도금된 전극의 전송특성을 측정할때 나타나는 가장 낮은 dip 150GHz 부근은 마이크로파 측정



(a) S_{11}



(b) S_{11}

그림 6. 전극 S-parameter(시편1)

Fig. 6. Electrode S-parameter(sample 1)

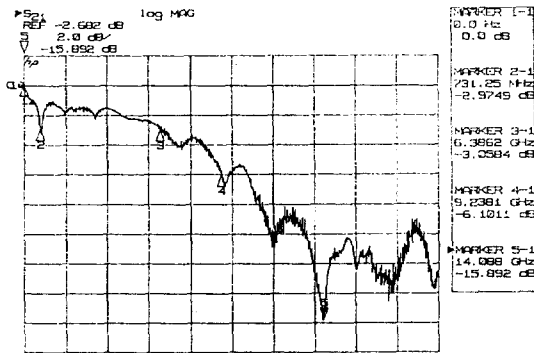
용 단자위치에 따라 이 dip이 조금씩 변화하게 된다. 이러한 결과로부터 마이크로파 단자와 닿게 되는 내부침 단면에 마이크로파 공진이 일어나 이러한 dip이 발생하는 것으로 생각된다. 이러한 특성의 resonance frequency f_r 은 다음식으로 계산된다¹⁰⁾.

$$f_r = \frac{C_o}{2} \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{2} + p}{n_{mo} w} \right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{2} + q}{n_{mc} h} \right)^2} \quad (7)$$

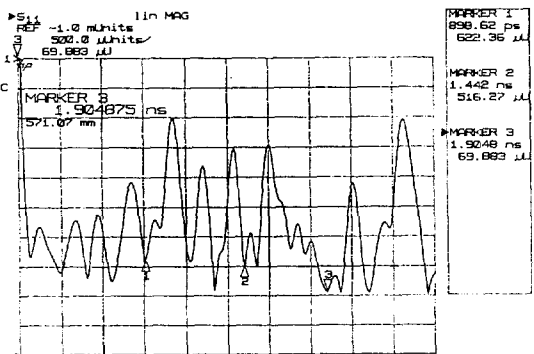
그림 6, 7두 결과를 비교 해 볼때, 그림에 나타난 곡선진동(damped oscillatory fluctuation)은 입력 및 출력단자 임피던스불일치의 다단반사에 연유하는 standing-wave pattern이고, 이론적으로 oscillation period는

$$v_p/2l \text{ 이다.}$$

본 실험에서 측정한 시편에서는 많은 임피던스 불연속 때문에 1개 이상 oscillation period가 존재



(a) S₂₁



(b) S₁₁

그림 7. 전극 S-parameter(시편2)

Fig. 7. Electrode S-parameter(sample 2)

한다. 이러한 임피던스 불일치는 time-domain reflection coefficient data 에서도 나타난다. 그리고 도금된 전극표면의 roughness 정도는 측정 고주파부분의 삽입손실을 증대시키는 결과를 낳는다. 또한 금도금 두께가 균일하지 못하고 얇은 경우에 이러한 현상이 커지게 되고, 따라서 전기도금시 표면 형상에도 관심을 기울여야한다. 마이크로파 특성중의 하나인 유효굴절율은 time-domain S₁₁ 측정에서 일주기-지연시간으로 결정하며 다음과 같다.

$$n_{eff}^m = \text{round trip time delay} \times \frac{c}{2l} \quad (8)$$

마이크로파 유효굴절율은 계산결과 2.45 였고, 개방 및 단락임피던스로 부터 계산한 저항은 14GHz까지 평균 44.18Ω을 나타냈다.

테이퍼 영역의 임피던스 불일치는 전극구조부분 중 테이퍼를 부분적으로 제거하고, 시편을 측정하면 개선되는 것으로 보아 마이크로파 전극 인가부분의 테이퍼 영역이 임피던스 부정합에 크게 영향

을 미치고 있음을 알 수 있었고, 따라서 전극 설계시 고려해야 할 사항으로 이러한 부분설계시 등급게 만드는 요령이 필요하다.

그림 7에서 S₂₁은 9GHz까지 완만한 감소를 보이고 있다. 이 범위에서 S₁₁은 -15dB 보다 더 낮은 작은 반사특성을 갖고 있다. 여기서는 나타내지 않았으나, 20GHz 이상에서 급작한 강하부분이 나타나는데 그 이유는 중앙도체와 금속 패키지간에 microstrip-line mode 형태인 high-order mode에 의해서 야기된 drop로 생각된다.

표 3. 제작한 CPW 진행파형전극의 마이크로파 특성 요약(시편 1)

Table. 3. Summary of microwave characteristic of fabricated CPW traveling-wave electrode

frequency (GHz)	impedance Z (short)	impedance Z (open)	impedance Z(characteristic)
1	34.09 -j126.39	63.051+j 59.477	54.6751-j91.418
2	32.97+j56.314	16.143 j 29.062	46.5737 j 0.527
3	14.74 j24.237	85.344 j 81.754	36.2563 j45.1444
4	120.7-j22.582	12.15-j 4.0195	39.5522 j 2.6646
5	29.73+j 9.614	53.965-j 42.904	45.6673 j 8.2851
6	18.4 -j22.04	30.488+j 28.887	34.5587 j 2.14049
7	72.22+j36.047	16.453 j 22.058	36.1544+j30.2333
8	17.80+j 1.351	71.918-j 7.552	35.7828+j 3.23601
9	57.5 j25.553	15.232+j 17.479	37.2915-j 8.25683
10	18.95+j21.449	21.694 j 3.227	23.5378-j 8.58541
11	33.65+j 1.821	36.52-j 47.92	40.9056 j18.8972
12	50.33+j21.543	22.276+j 27.175	42.6045-j10.4194
13	41.33+j68.574	103.56+j 92.883	67.2639+j81.3243
14	95.06-j 5.543	53.738+j 45.918	77.7608+j26.1513
15	161.19-j 61.086	154.0-j 64.131	169.742 j 3.21436
16	64.16-j67.363	99.73 -j107.27	79.995-j85.009
17	93.61-j60.93	70.336-j 47.148	81.146 j53.6019
18	19.95-j44.898	14.105-j 49.0922	17.129-j47.0758
19	14.44 j 6.7949	17.276-j16.141	16.08 -j10.8978
20	19.4 j10.541	13.49 -j 8.805	16.195-j 9.6664

IV. 결 론

본 연구를 수행하기전 이미 10GHz 이상의 대역폭을 갖는 진행파형 CPW 전극을 설계하고 분석한 바 있으며³⁾, 본 연구에서는 광변조기제작을 위한 전 공정을 확립하였고, 전극을 제작, 분석하였다. 특히 전극공정은 미세패턴에 두꺼운 금속전극을 전기도금하는 방법이 핵심으로 본 연구를 통하여 기술을 확보하였으며, 또한 20μm이상 올릴 수 있

음을 확인하였다. 또한 제작된 전극의 마이크로파 전송특성에 관해서 논의하였다.

본 연구는 전자부품종합기술연구소의 정보통신용 핵심부품개발사업 일환으로 수행되었음을 밝혀둡니다.

참 고 문 헌

1. Hisao Kawashhima, Atsushi Toyohara, Ken-ichi Nakaya, Yuji Iseki, "Ti:LiNbO₃ optical waveguide switch and modulator," NEC 技報, Vol.45, No.10, pp.21-27, 1992
2. 광대역 전기광학 광변조기의 진행파형 전극구조에 관한 연구보고서, KETI-RD-94017, 전자부품 종합기술연구소, 1994.7.
3. 김성구, 윤형도, 윤대원, 유용택, "Coplanar waveguide-type traveling-wave LiNbO₃ 광변조기 전극설계 및 분석", 제 32권 A편 제 12호.
4. Kazuto Noguchi, Toshio Suzuki, Mitsuaki Yanagibashi, Hiroshi Miyazawa, Osama Mitomi, "Shielded velocity-matched LiNbO₃ optical modulator," NTT R&D, Vol.41, No.9, pp.1103-1112, 1992
5. T.Kitoh and K.Kawano, "Modeling and Design of Ti:LiNbO₃ Optical Modulator electrodes with a buffer layer" 전자정보통신학회논문지 C-I Vol. J75-C-I, No.6, pp.402-426, 1992
6. K.Noguchi, "High-speed shielded velocity-matched Ti:LiNbO₃ Modulator", IEEE Journal of Quantum Electronics Vol.29, No.9, 1993, pp. 2466-2475
7. M.Seino, N.Mekada, T.Yamane, Y.Kubota, M.DoI and T.Nakazawa, "20GHz 3dB bandwidth Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder Modulator" ECOCO'90, pp.999-1002, 1990
8. Haeyang Chung, Wiliam S.C.Chang, and Gary E.Betts, "Microwave properties of Traveling-wave electrode in LiNbO₃ electrooptic modulators" Journal of Lightwave Technology, Vol .11, No.8, 1993, pp.1274-1278
9. G.K.Gopalakishman, W.K.Burns and C.H. Bulmer, "Traveling wave LiNbO₃ optical modulators "Electronics Letters Vol.28, No.2, pp.207-209, 1992
10. T.Nozaawa, K.Kawano, M.Yanagibashi, and H.Jumonji, "Broad-band and low driving-power LiNbO₃ external optical modulators" ,NTT R&D Vol.38, No.6, 1989, pp.629-638.
11. O.G. Ramer, "Integrated optic electrooptic modulator electrode analysis," Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-18, No.3, pp.386-392, March 1982
12. H.Chung, W.S.C.Chang, and E.L.Adler, "Modeling and optimization of traveling-wave LiNbO₃ interferometric modulators," Journal of Quantum Electronics, Vol.27, No.3, pp.608-617, March 1991
13. R.A.Becker, "Traveling-wave electro-optic modulator with maximum bandwidthlength product," Appl. Phys. Lett., 45(11), pp.1168-1170, Dec. 1984
14. Albert C.T.Wey, Julian P.G.Bristow, S. Stiram, Daniel Ott, "Electrode optimization of high speed Mach-Zehnder interferometer," SPIE Vol.835, Integrated Optical Circuit Engineering, pp.238-245, 1987
15. M.Rangaraj, T.Hosoi and M.Kondo, "A Wideband Ti:LiNbO₃ optical modulator with conventional coplanar waveguide type electrode", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.4, No.9, 1992, pp.1020-1022.
16. 광대역 광변조기의 온도 및 Bias Drift 보상 회로 개발, 전자부품종합기술연구소, KETI-RD-95006-2, 1995.4