

論文97-34D-8-10

H:LiNbO₃ 광변조기에서 Parylene 버퍼층의 유용성

(Utilities of Parylene buffer layer in H:LiNbO₃ optical modulator)

許 賢 * 潘 在 景 *

(Hyun Huh and Jae-Kyung Pan)

요 약

유기물질이며 상온 진공증착이 가능한 parylene 폴리머는 기존의 SiO₂에 비해 물리적, 전기적인 특성이 우수하고, 특히 저온 공정이 요구되는 양자교환 LiNbO₃ 광변조기의 경우 재현성 있는 소자제작에 매우 유리하다. 본 논문에서는 SiO₂ 버퍼층을 적용한 경우와 본 논문에서 제안하는 폴리머 버퍼층을 적용한 경우의 광변조기 특성 변화를 계산하기 위하여 각 버퍼층의 두께변화에 따른 M/W유도굴절율 및 특성임피던스를 계산하였다. 이와 같은 수치적 해석을 위해 본 논문에서는 유한요소법을 사용하였다. 또한 공정 면에서 parylene박막의 유용성을 확인하기 위해 기판 및 금속박막과의 접착특성과 증착된 박막의 열적 화학적 반응 특성을 실험하였다. 모의실험을 통해 똑같은 전극구조에 대하여 더욱 얇은 두께에서 parylene이 SiO₂에 비하여 50Ω 특성임피던스와 2.2 M/W유도굴절율에 접근하였고, parylene 박막의 물리적·화학적 특성도 우수함을 확인하였다.

Abstract

H:LiNbO₃ optical modulator buffered by parylene layer, which has a merits in the bandwidth, power consumption and fabrication as compared with conventional SiO₂ buffered optical modulator, is proposed and analyzed. The dependences of velocity matching condition, characteristic impedance, and driving voltage on dielectric constants, thickness of buffer layer, and electrode configurations are demonstrated with finite element calculation. And we performed the physical and chemical test of parylene buffer layer deposited on LiNbO₃ and under Au electrodes.

I. 서 론

광통신 시스템의 광대역성을 유효 적절하게 이용하기 위해 전송능력을 증가시키는 연구가 국내외적으로 활발하며, 이에 LiNbO₃ 외부 광변조기는 고속, 광대역 광통신 시스템의 실현에 매우 중요한 위치를 차지하

고 있다. LiNbO₃에서 광 도파로의 형성은 1000℃정도의 고온에서 Ti과 같은 금속을 확산하거나^[1], 상대적으로 낮은 온도(~400℃)에서 공정이 가능한 양자교환법에 의해 이루어지고 있다.^[2] 그리고 LiNbO₃ 외부 광변조기의 광대역 구현을 위해 진행파형 전극구조가 선호되고 있으며, 특히 LiNbO₃의 높은 유전상수에 의한 광파와 진행파 전극상의 M/W(Microwave) 변조파와의 위상속도 부정합과 50Ω 특성임피던스 불일치 및 전극의 전도손실에 의한 변조대역폭 제한을 극복하기 위하여 위상반전 전극^[3], 차폐 접지전극^[4], 후막전극 구조^[5] 와 같은 전극형태에 따른 연구와 ACPS(asymmetric coplanar strip), CPW등의 전극

* 正會員, 全北大學校 電氣工學科

(Dept. of Elec. Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.)

※ 본 연구는 정보통신부 대학 기초연구지원사업(과제 번호 : 96114-BT-II)에 의하여 수행되었습니다.

接受日:1996年10月31日, 수정완료일:1997年7月10日

배열형태에 따른 연구가 이루어지고 있으며, 두꺼운 버퍼층(SiO₂) 삽입과 ridge형 도파로^[4] 도입과 같은 변조기 형태를 변형하여 연구되고 있다.

이상과 같이 현재까지 발표된 대부분의 결과는 전극두께, 전극형태, 도파로형태 및 SiO₂버퍼층의 두께와 같은 외형적 구조변경을 통한 특성개선 방향으로 이루어지고 있다. 특히 본 논문에서 다루고자 하는 버퍼층에 대한 연구는 단지 SiO₂층의 두께 조절에 대한 연구만이 이루어져 있다.^[6] 버퍼층은 금속전극에 의한 도파로의 손실을 감소시키고 LiNbO₃의 높은 유전상수의 완충을 통한 광대역변조 및 특성임피던스 정합을 위해 대부분의 소자의 제작에 적용되고 있다.

그러나 SiO₂버퍼층의 삽입은 구동전압 상승이 요구되고, 또한 공정상의 문제점으로 SiO₂버퍼층과 그 위에 형성될 Au전극패턴의 고착력(adhesion)이 떨어지므로 대부분의 실험에서 Cr과 같은 추가적인 금속 완충층 삽입과 추가적인 열처리가 요구되고 있다. 그리고 대부분 SiO₂층의 형성은 PECVD공정을 통해서 이루어지고 있으나 최근 발표^[7]에 의하면 200℃ 이하 공정에서 SiO₂의 유전상수값은 실제 설계과정에서 적용하는 값인 4.0보다 훨씬 증가된 7~10정도의 값을 보이고 있다. 이러한 문제점은 350℃정도의 고온 PECVD공정으로 보상될 수 있으나, 양자교환방법에 의해 형성된 도파로를 이용할 경우에는 추가적인 도파로의 확산이 발생되므로 재현성 있는 소자설계 및 제작이 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 저온의 버퍼층 공정 및 전극공정이 가능하도록 폴리머 버퍼층을 적용한 광변조기의 해석적 결과를 제시한다. 즉 MCM(multichip module) 및 sub-micron 집적회로분야에서 활발한 연구가 되고 있는 낮은 유전상수 물질을 본 논문에서는 버퍼층으로 사용하고자 한다. 특히 parylene류의 폴리머는 500℃정도에 이르는 높은 열적 안정성, 2.2~2.6정도의 매우 낮은 유전상수, Au와 같은 금속과의 높은 접착특성과, 무엇보다도 상온의 증착공정이 가능하여 우수한 박막특성과 정밀한 박막두께 조절이 가능한 것으로 알려져 있어 광변조기의 특성 및 공정개선을 위해 유리할 것으로 생각된다^[8].

본 논문에서는 먼저 구성된 전극에 대하여 최대 변조효율을 얻기 위한 광도파로의 상대적인 위치를 찾는다. 그리고 SiO₂버퍼층을 적용한 경우와 본 논문에서

제안하는 폴리머 버퍼층을 적용한 경우의 광변조기 특성 변화를 계산하기 위하여 각 버퍼층의 두께변화에 따른 M/W유효굴절율 및 특성임피던스를 계산하였다. 이와 같은 수치적 해석을 위해 본 논문에서는 유한요소법(FEM ; Finite Element Method)을 사용하였다.^[9,10] 수치해석 과정에서 SiO₂의 유전상수를 3.9, 그리고 폴리머의 유전상수를 2.6인 경우로 가정하였으며, 결국 같은 전극구조에 대하여 더욱 얇은 두께에서 폴리머가 SiO₂에 비하여 50Ω 특성임피던스와 2.2 M/W유효굴절율에 접근하는 것을 확인하였다. 그리고 parylene박막의 공정에 따른 물리적·화학적 특성을 알아보기 위해 기초적인 실험을 수행하였으며, 실험결과 parylene의 LiNbO₃ 및 Au와의 충분한 고착특성, 열적 안정성 및 각종 etchant에 대한 내화학성을 확인하였다.

II. 이론적 배경

1. LiNbO₃ 외부 광변조기

LiNbO₃를 기판으로 사용한 광변조기는 가장 큰 전기광학계수인 r₃₃(30pm/V)를 이용하며, 매질의 결정 z축에 따라 편광된 빛을 같은 방향의 M/W 변조과 전계에 의하여 굴절률을 식(1)과 같이 변화시킨다.

$$\Delta n = -(1/2)n_{33}^3 r_{33} E_3 \quad (1)$$

이때 n₃₃는 매질의 이상광에 대한 굴절률이며, 그림 1에서와 같은 z-cut LiNbO₃ 광변조기에서는 수직방향의 외부전계 성분이 소자의 변조특성을 결정한다.

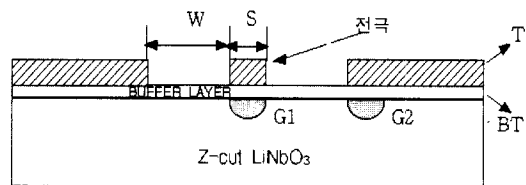


그림 1. z-cut LiNbO₃ 광변조기 및 설계파라미터
Fig. 1. z-cut LiNbO₃ optical modulator and design parameters

2. 유한요소법에 의한 진행파형 전극해석

비등방성 매질내의 진행파형 전극해석을 위한 수치해석 도구로써 2차원 삼각형요소를 사용한 FEM을 이용하였다. M/W 변조파는 quasi-TEM 모드로 가정

하고 식(2)와 같은 Laplace방정식을 풀었다.

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

이때 ϵ_x (43)와 ϵ_y (28)는 z-cut LiNbO₃의 수평 및 수직방향의 유전상수를 나타내며, 자유공간에서는 ϵ_x 와 ϵ_y 를 1로 놓았다. 그리고 $\phi(x, y)$ 는 전위분포를 나타내며, 해석 영역에서의 전위분포를 식(3)과 같은 부분 전위함수로 나누어 계산한다.

$$\phi(x, y) = [N]^T \phi_c \quad (3)$$

이와 같은 함수들에 Galerkin의 변분원리를 적용하여 최종적인 대수방정식이 얻어지고 반복법을 이용하여 전체 전위분포를 구하였다. 이때 [N]은 2차 삼각형 요소를 위한 모양함수이고 ϕ_c 는 요소의 노드점 전위벡터이다.^[9,10] 그리고 TEM형 전송선로에서 주파수가 높은 경우 특성저항 Z_c 및 M/W 유효굴절률 n_m 은 다음과 같이 표현된다.^[11]

$$Z_c = \frac{1}{v_m \cdot C_c} = \frac{1}{v_o \cdot \sqrt{c_o \cdot c_c}} \quad (4)$$

$$n_m = \frac{v_o}{v_m} = \sqrt{\frac{c_c}{c_o}} \quad (5)$$

이때 v_c 및 v_m 은 자유공간에서 광 및 변조파의 속도, c_c , c_o 는 매질 및 자유공간에서 전극에 의한 정전용량이며, 이 값들은 FEM 전극해석을 통하여 구할 수 있다.

3. 저전압 구동을 위한 전극과 광도파로의 상대적 위치

일단 특성임피던스 및 M/W 변조파의 위상속도가 충분히 일치되었다면, 다음으로 구동전압과 변조길이의 곱과 관련된 변조기의 효율을 평가하게 된다. 외부 전극에 의한 z-cut LiNbO₃ 광변조기의 인가전압 V_o 에 따라서 식(1)을 식(6)과 같이 overlap 적분상수 Γ 를 이용하여 나타낼 수 있고, 이에 따른 변조기 반파전압 $V\pi$ 는 식(7)로 나타내어진다.^[12]

$$\Delta n = -(1/2)n_{33}^3 r_{33}(\Gamma_{G1} + \Gamma_{G2}) \frac{V}{W} \quad (6)$$

$$V\pi = \frac{\lambda \cdot W}{n_{33}^3 \cdot r_{33} \cdot L \cdot (\Gamma_{G1} + \Gamma_{G2})} \quad (7)$$

이때 W는 중심전극과 접지전극 사이의 간격을 나타내고, Γ_{G1} , Γ_{G2} 는 두 도파로 G1, G2에서 파장 λ 의 도파관과 외부전계와의 overlap 적분상수를 나타내며 0과 1사이의 값을 가진다. 수치적으로 overlap 적분상수를 구하기 위하여 정규화된 광파를 이용하며, 보통 광이 약하게 구속되어 도파하는 경우 깊이 방향으로는 Hermite-Gaussian 분포, 그리고 수평방향으로는 Gaussian분포로 가정한다.

그리고 이러한 정규화 광파 외부전극에 의한 전계와의 overlap 적분상수는 식(8)과 같이 표현된다^[12].

$$\Gamma = \frac{W/V_o \iint E_{op}(x, y)^2 \cdot E_{el}(x, y) dx \cdot dy}{\iint E_{op}(x, y)^2 dx \cdot dy} \quad (8)$$

효율적인 변조특성을 얻기 위해서는 z-cut 변조기의 경우 수직방향 전계의 세기 E_y 가 가장 큰 값으로 넓게 위치하는 곳에 광도파로를 구성시켜야 한다. 그림 2에서는 S=8 μ m 중심전극폭과 W=16 μ m 전극간격 및 T=1 μ m 두께의 전극구조에 대하여 FEM 및 수치적분을 이용하여 E_y 의 y의 위치에 따른 분포를 나타내고 있다.

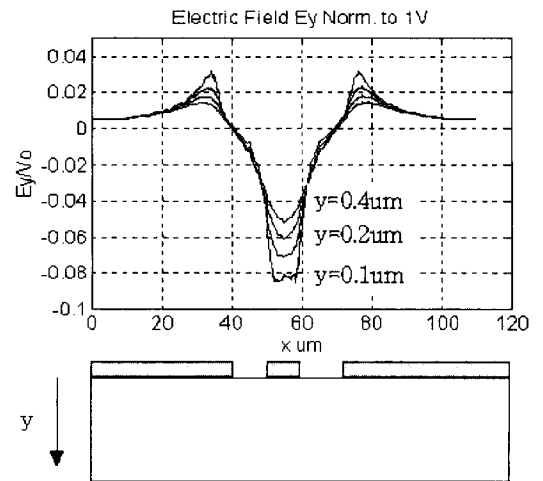


그림 2. 수직방향 외부전계의 분포 (E_y)

Fig. 2. Distribution of vertical electric field (E_y)

즉 중심전극 아래에서 가장 큰 수직방향 전계값을 나타내고, 좌우 접지전극에서는 전극의 안쪽 모서리 근처에서 최대 수직전계값을 보이고 있다. 보통 중첩상수는 이상과 같은 전계분포와 광도파로와의 상대적

인 위치뿐만 아니라 전극의 폭, 간격, 완충층의 두께 및 광신호의 모드 크기에 따라 변한다. 따라서 이와 같이 큰 전계분포를 나타내는 위치 근처에서 최대 overlap 중첩상수를 가지도록 광도파로를 위치시켜야 저전압 구동에 유리함을 알 수 있다. 일반적으로 Mach-Zehnder 도파로 z-cut LiNbO₃ 광변조기의 경우 한쪽 arm은 중심전극 가운데에 위치시키고, 접지전극 아래의 다른쪽 arm은 구동전압에 미치는 영향이 작기 때문에 접지전극의 안쪽 모서리부분과 도파로의 모서리가 일치하도록 설계하고 있다.

III. 버퍼층의 유전상수 및 두께에 따른 광변조기 특성

LiNbO₃ 광변조기의 버퍼층으로 3.9의 유전상수를 가지는 SiO₂와 2.6의 유전상수를 가지는 parylene폴리머에 대한 전기적, 광학적 특성을 앞에서 언급한 FEM에 의해 비교 분석하였다. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 광변조기의 설계를 위한 파라미터로는 중심전극 폭 S, 중심전극과 접지전극의 사이간격 W, 버퍼층의 두께 BT 및 전극의 두께T 등이 있다. 이와 같은 설계인자들은 상호 복합적인 작용을 통해서 소자의 특성을 변화시킨다.

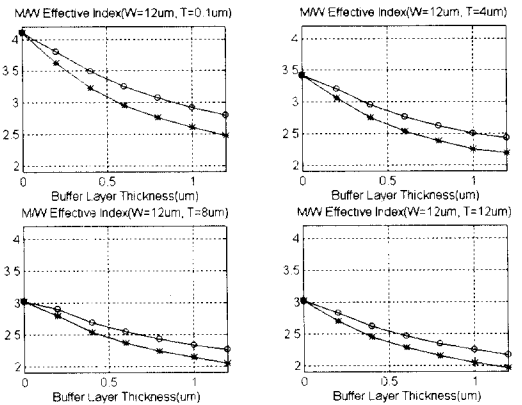
본 논문에서는 먼저 버퍼층 이외의 설계파라미터를 고정시킨 뒤, SiO₂버퍼층과 parylene버퍼층의 특성비교를 위해 각 버퍼층의 두께를 0 μ m, 0.2 μ m, 0.4 μ m, 0.6 μ m, 0.8 μ m, 1 μ m, 1.2 μ m 각각 변화시키면서 M/W유효굴절율과 특성임피던스를 계산하였다. 그리고 전극의 두께변화 및 전극간격에 대한 계산도 수행하였다. 표 1에는 본 논문에서 수행한 모의실험의 설계파라미터를 나타내었으며, SiO₂와 parylene버퍼층에 대해 각각 56개의 설계조건에 따라 계산하였다.

표 1. 모의실험을 위한 설계조건
Table 1. Design parameters for simulation

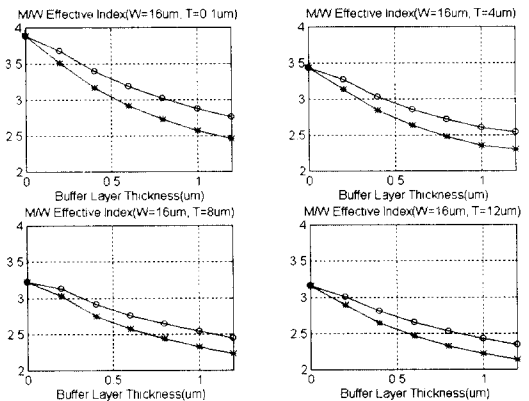
설계파라미터	모의실험 데이터	단위
S(중심전극 폭)	[8]	μ m
W(전극간격)	[12, 16]	μ m
T(전극두께)	[0.1, 4.0, 8.0, 12.0]	μ m
BT(버퍼층 두께)	[0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2]	μ m

각각의 모의실험은 충분히 수렴된 해가 도출될 때까지 수행하였으며, 결국 각 조건에 따라 그림 3과 같은 결과를 얻게되었다. 그림 3(a), (c)는 전극간격 W=12 μ m, 그리고 그림 3(b), (d)는 전극간격 W=16 μ m에 대하여 전극 및 버퍼층 두께를 변화시키면서 계산된 M/W 유효굴절율과 특성임피던스이다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 똑같은 전극구조에 대하여 더욱 얇은 두께에서 parylene이 SiO₂에 비하여 50 Ω 특성임피던스와 2.2 M/W 유효굴절율에 접근하는 것을 확인하였다. 예로써 W=12 μ m, T=8 μ m인 그림 3(c)의 3번째 결과는 50 Ω 특성임피던스의 경우 SiO₂는 1.2 μ m 정도의 두께가 요구되고, parylene은 0.8 μ m의 두께가 필요하다. 또한 2.2 M/W 유효굴절율도 SiO₂는 약 2 μ m가 필요하고 parylene은 1 μ m의 버퍼층이 요구된다.

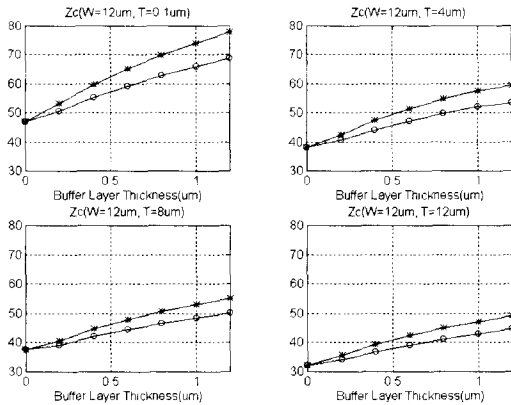
다음은 새로운 parylene버퍼층의 사용에 따른 광변조기의 구동전압에 미치는 영향을 계산하였다. 구동전



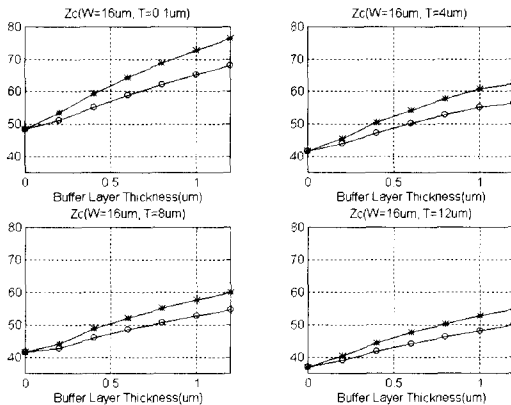
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. (a) M/W 유효굴절율 ; S=8 μ m, W=12 μ m (* : Parylene, o : SiO₂), (b) M/W 유효굴절율 ; S=8 μ m, W=16 μ m (* : Parylene, o : SiO₂), (c) 특성임피던스 ; S=8 μ m, W=12 μ m (* : Parylene, o : SiO₂), (d) 특성임피던스 ; S=8 μ m, W=16 μ m (* : Parylene, o : SiO₂)

Fig. 3. (a) M/W Effective Index ; S=8 μ m, W=12 μ m (* : Parylene, o : SiO₂), (b) M/W Effective Index ; S=8 μ m, W=16 μ m (* : Parylene, o : SiO₂), (c) Characteristic Impedance ; S=8 μ m, W=12 μ m (* : Parylene, o : SiO₂), (d) Characteristic Impedance ; S=8 μ m, W=16 μ m (* : Parylene, o : SiO₂)

압의 계산을 위해 먼저 도파관의 모드 패턴을 가정하였고, 식(8)과 (7)을 사용하여 각각의 전극형태에 따른 overlap 적분상수 및 구동전압을 계산하였다. 본 논문에서는 양자교환에 의한 도파로를 가정하였고 단일모드 도파관의 수평방향 Gaussian모드패턴의 반치폭을 $w_x=5.5\mu$ m, 수직방향 Hermite-Gaussian모드패턴의

반치폭을 $w_y=4.5\mu$ m, 그리고 사용광파의 파장을 $\lambda_0=1.55\mu$ m로 가정하였다. 그림 4는 버퍼층 두께 및 유전상수에 따라 구동전압을 계산한 결과이다. 전극의 두께변화에 대해 구동전압은 일정하였고 버퍼층의 두께의 증가에 따라 선형적으로 구동전압이 증가함을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 제안한 parylene버퍼층 구조의 광변조기가 SiO₂버퍼층 구조에 비해 높은 구동전압이 요구됨을 알 수 있었다. 그러나 이와 같이 parylene버퍼층의 낮은 유전상수에 따라 더 높은 구동전압이 요구되지만 M/W 유효굴절율 및 특성임피던스 매칭을 고려할 경우 앞선 결과와 같이 전체적인 버퍼층 두께의 감소가 가능함으로 이러한 구동전압 증가는 보상될 수 있다.

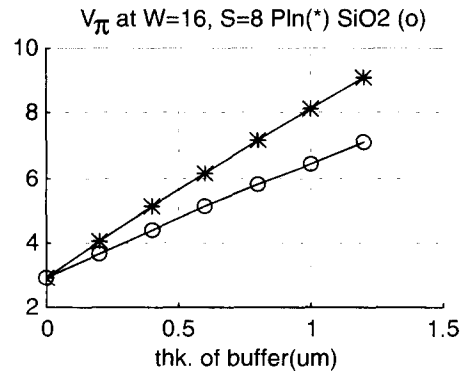
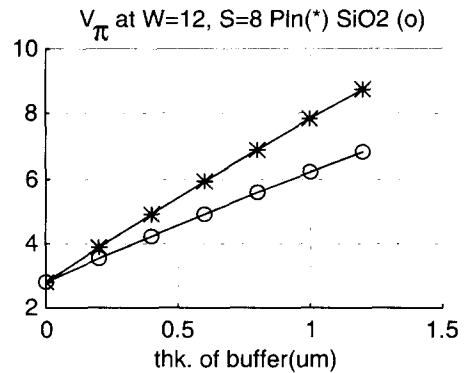


그림 4. Parylene과 SiO₂ 버퍼층의 두께에 따른 구동전압 V π

Fig. 4. Driving voltage V π as thickness of Parylene and SiO₂ buffer layer

IV. Parylene박막의 물리·화학적 특성

버퍼층은 금속전극에 의한 도파관의 손실을 감소시키고, LiNbO₃의 높은 유전상수의 완충을 통한 광대역

변조 및 특성임피던스 정합을 위해 적용되고 있다. 그러나 기존 SiO_2 버퍼층은 그 위에 형성된 Au전극패턴의 고착력이 떨어지므로 Cr과 같은 추가적인 금속 완충층 삽입과 추가적인 열처리가 요구되고 있다. 그리고 대부분 SiO_2 층의 형성은 PECVD공정을 통해서 이루어지고 있으나 $200^\circ C$ 이하 공정에서 SiO_2 의 유전상수값은 실제 실제과정에서 적용하는 값인 4.0보다 훨씬 증가된 7~10정도의 값을 보이고 있으며^[7], 이러한 문제점은 $350^\circ C$ 이상의 고온 PECVD공정이 요구된다. 그러나 양자교환방법에 의해 형성된 광 도파로 소자에 적용할 경우에는 추가적인 도파로의 확산이 발생되므로 재현성 있는 소자설계 및 제작이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 고려하여 parylene 버퍼층을 적용하였고 광변조기의 제작공정과 관련된 parylene박막의 유용성을 확인하기 위해 물리적·화학적 특성실험을 수행하였다. 즉 parylene 박막의 $LiNbO_3$ 및 Au와의 고착특성, 버퍼층 이후 공정들에 의해 요구되는 열적 안정성 및 각종 etchant에 대한 내화학성 등을 실험하였다.

충분히 세척된 $LiNbO_3$ 기판 위에 parylene을 상온에서 $2\mu m$ 증착^[8] 하였고 고착력 실험을 위해 사무용 접착테이프를 이용하여 충분한 세기로 잡아당긴 경우 박막의 고착상태가 유지됨을 확인하였다. 그리고 parylene이 증착된 기판 위에 Au 박막을 약 800\AA 증착 하였고 역시 고착력 테스트를 위해 같은 방법으로 수행하였으며 충분한 고착력이 확인되었다. 이와 같은 결과는 다음 공정들에 대해 충분한 고착력을 가지고 광변조기의 제작이 이루어질 수 있음을 알 수 있었다. 다음은 제작공정에 따른 온도증감의 parylene박막에 대한 영향을 확인하기 위해 Au가 증착된 기판을 $200^\circ C$ 에서 2시간 가열하였고, 가열전과 가열후의 저항, 박막두께 및 표면상태를 비교하였다. 박막의 상태변화를 측정된 결과 가열전·후 parylene 및 Au박막의 두께 및 표면상태의 변화가 일어나지 않았음을 확인하였다. 마지막으로 Au etchant, PR developer 및 stripper에 대한 내화학성을 실험하기 위해 간단한 PR 패턴을 Au 박막에 형성하였으며, Au 식각을 수행하였다. 실험결과 우수한 전극패턴을 확인하였고, 이를 위해 사용된 화학물질에 대한 부식과 같은 특별한 문제점은 발견되지 않았다.

결국 Au와 같은 금속과의 높은 접착특성과, 공정에

사용되는 화학물질에 대한 내화학성, 그리고 무엇보다도 상온의 증착공정이 가능하여 우수한 박막특성과 정밀한 박막두께 조절이 가능하여 재현성 있는 양자교환 광변조기의 제작 및 공정개선을 위해 유리할 것으로 생각된다

V. 결 론

본 논문에서는 양자교환에 의한 $LiNbO_3$ 광도파로 형 변조기의 재현성 있는 구현을 위해 저온의 버퍼층 공정 및 전극공정이 가능하도록 폴리머 버퍼층을 적용한 구조에 대하여 연구하였다. 새로운 버퍼층 재료로 높은 열적 안정성과 2.2 ~ 2.6정도의 매우 낮은 유전상수, 그리고 무엇보다도 상온의 증착공정이 가능하여 우수한 박막특성과 정밀한 박막두께 조절이 가능한 것으로 알려져 있는 parylene계 폴리머를 적용하였다. 기존의 SiO_2 버퍼층을 적용한 경우와 parylene 폴리머 버퍼층을 적용한 경우의 광변조기 특성 변화를 계산하기 위하여 각 버퍼층의 두께변화에 따른 M/W유효굴절율 및 특성임피던스를 FEM을 사용하여 계산하였다. 결국 SiO_2 버퍼층을 이용한 경우에 비해 제안된 폴리머 버퍼층을 이용할 경우 더욱 낮은 두께로 광대역 설계가 가능함을 제시하였다. 특히 Au 박막과의 높은 고착력 및 공정에 사용되는 화학물질에 대한 내화학성 및 상온증착이 가능한 parylene계 폴리머 버퍼층의 적용으로 양자교환 광도파로 구조 광변조기의 재현성 있는 구현을 위해 매우 유용할 것이며, 또한 기타 비슷한 구조의 집적광학소자의 성능 및 공정개선을 위해 적용이 가능할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "A Broadband $Ti:LiNbO_3$ Optical Modulator with a Ridge Structure", J. Lightwave Technol., vol. 11, pp. 1164-1168, 1995.
- [2] Y.S. Son, H.J. Lee, S.Y. Yi, and S.Y. Shin, "Proton-diffused channel waveguide on Y-cut $LiNbO_3$ using a self-aligned SiO_2 -cap diffusion method," SPIE vol. 1374 Integrated Optics and Optoe-

- lectronics II, pp. 23-29, 1990.
- [3] R.C. Alferness, S.K. Korotoky, E. Marcatili, "Velocity-matching technique for integrated optic travelling wave switch/modulators," IEEE. J. Quantum Electron., OE-20, No. 3, pp. 301-309, Mar. 1984.
- [4] K. Kawano, "Effect of Ridge Depth on Characteristics of Shielded Velocity-Matched(SVM) Ti:LiNbO₃ Optical Modulators with Ridge Structures," IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol.5, No.9, pp. 993-995, 1993.
- [5] G. K. Gopalakrishnan, C. H. Bulmer, W. K. Burns, R. W. McElhanon and A. S. Greenblatt, "40GHz, Low Half-Wave Voltage Ti:LiNbO₃ Intensity Modulator," Electron. Lett., Vol.28, No.9, pp.826-827, 1992.
- [6] K. Kawano, T. Kitoh, O. Mitomi, T. Nozawa and H. Jumonji, "A Wide-Band and Low-Driving-Power Phase Modulator Employing a Ti:LiNbO₃ Optical Waveguide at 1.5 μ m Wavelength," IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol.1, No.2, pp. 33-34, 1989.
- [7] P. Kohl, M. Ceiler, S.A. Bidstrup and G. May, Proc. Electrochem. Soc., Honolulu, Hawaii, May 16-21, 1993, Vol. 93-1, 1947(1993).
- [8] L. You and G.-R. Yang, et. al, "Vapor deposition of parylene-F by pyrolysis of dibromotetrafluoro-p-xylene," J. Vac. Sci. Technol. A 11(6), p. 3047, Nov/Dec 1993.
- [9] Jianming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [10] 김창민, 한상필, "Ti:LiNbO₃ 진행파 광변조기의 FEM 전극해석 및 대역폭 예측," 전자공학 회논문지, Vol. 32(A), No. 2, pp. 96-109, 1995
- [11] T.C.Edwards, "Foundations for microstrip circuit design," John Wiley & Sons, Inc, 1981.
- [12] X. Zhang and T. Miyoshi, "Optimum Design of Coplanar Waveguide for LiNbO₃ Optical Modulator," IEEE. Tans. on MTT, Vol. 43, No. 3, 1995.

 저 자 소 개

潘 在 景(正會員) 第 33卷 A篇 第 5號 參照

현재 전북대학교 전기전자제어공학부
부교수, 전북대학교 전기전자회로합성
연구소 연구원

許 賢(正會員) 第 33卷 A篇 第 5號 參照