

論文95-32A-7-13

양자교환된 LiNbO₃에서 박막도파형 음향광학 광변위기(Thin Film Acoustooptic Beam Deflector in Proton-Exchanged LiNbO₃)

金成國*, 白雲碩**, 金光鐸*, 鄭成甲***, 宋在元*

(Seong Kuk Kim, Woon Suek Baek, Kwang Tek Kim, Sung Gab Jung and, Jae Won Song)

요 약

본 논문에서는 양자교환된 Y-컷 LiNbO₃에서 박막도파형 음향광학 광변위기를 설계 및 제작하고 제작된 소자의 특성을 측정하였다. 박막 도파로는 양자교환후 어닐링을 하여 형성시켰다. 표면 음향파의 여기를 위한 인터디지털 트랜스듀서는 레이저 사진술을 이용하여 제작하였다. 음향광학 광변위기의 표면 음향파의 파장은 중심주파수 174MHz에서 20 μ m이다. 도파된 광파와 표면 음향파의 상호작용 길이는 2.16mm이다. 헬륨-네온 레이저로 측정된 3dB 대역폭은 17MHz이었다. 그리고 970mW RF 구동 전력에서 70%의 회절효율이 얻어졌다.

Abstract

Thin film acoustooptic beam deflector in proton-exchanged Y-cut LiNbO₃ was fabricated and measured. The planar waveguide was fabricated by using the proton-exchanged and annealing method in Y-cut LiNbO₃. Interdigital transducer for SAW(surface acoustic wave) was made by the laser lithography. Using above method, the thin film acoustooptic beam deflector was constructed. Its SAW wavelength was 20 μ m at 174MHz center frequency. The interaction length between guided optical wave and SAW was 2.16mm. The measured 3dB bandwidth was 17MHz using a He-Ne laser. And 70% diffraction efficiency was obtained at 970mW RF driving power.

I. 서 론

전기-광 신호의 상호작용은 가해진 전계에 의해서

* 正會員, 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

** 正會員, 國防科學研究所
(Agency for Defence Development)

*** 正會員, LG전자
(LG Electronics, Ltd.)

接受日字: 1994年11月1日, 수정완료일: 1995年7月4日

유전체 매질의 광학적 성질을 직접 변화시킴으로써 생기는 전기광학 효과(electro-optic effect), 전기적 신호가 음향적인 교란으로 바뀌어서 매질의 광학적 성질을 변화시켜 광 전기간의 상호작용을 유발시키는 음향광학 효과(acousto-optic effect) 등이 있다^[1].

음향광학 효과를 이용한 광변위기는 그 구조상 벌크형과 박막도파형으로 나누어진다. 박막도파형 광변위기(thin film acoustooptic beam deflector)는 벌크 구조에 비해 높은 전력밀도, 긴 상호작용 길이, 표면음향파 여기를 위한 전극제작에 있어서의 용동성, 고집적

울 등으로 집적광학 소자에 있어서 매우 유용한 소자라고 말할 수 있다^[2]. 이러한 박막도파형 광변위기는 광변조기, 광변위기, 튜닝 가능한 필터, RF 스펙트럼 분석기 및 광 신호처리 등 여러 분야에 응용된다^[11].

1922년 Brillouin은 광-음향파의 상호작용을 예견했으며, 1932년 Debye등이 이를 실험적으로 증명했다^[11]. 그 이후 1960년대까지는 주로 벌크형 음향광학에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 1967년 Ippen^[3]이 표면 음향파와 도파광의 상호작용을 실험적으로 관찰한 이후 1970년 이래로 박막도파 구조형 음향광학에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 1970년 Kuhn^[4]등이 표면 음향파에 의한 도파광의 회절을 최초로 실험적으로 보여주었다. 1975년 Schmidt^[5]등이 LiNbO_3 에 티타늄 내부확산(Ti-indiffusion) 방식을 사용하여 동일물질로 기판과 도파로를 만들고, 도파로 위에 직접 전극을 만들었으며, 높은 효율의 음향광학 소자를 제작했다. 그후 주로 음향광학 소자는 LiNbO_3 에 티타늄 내부확산 방식으로 제작되고 있다. 1980년대 초에 양자교환에 의한 도파로 제작방법이 연구되었고, 1986년에 Dawar^[6]등은 Y-컷 LiNbO_3 에 양자교환 방식으로 도파로를 형성한 음향광학 광 회절기를 최초로 제작하였다.

양자교환 방식에 의한 도파로 제작은 높은 굴절율 변화, 적은 광손실, 비교적 간단한 제작과정 등 여러가지 장점이 있다. 그러나 굴절율의 불안정성과 전기 광학계수 감소, 특히 표면 음향파(Surface Acoustic Wave: SAW)의 특성을 저하시키는 단점이 있다. 양자교환에 의한 표면 음향파의 특성 저하는 주로 표면 음향파의 여기를 위한 전극에서 전기-음향파 변환효율 감소, 교환된 양자의 농도에 따른 표면음향파 전파손실 증가, 도파로 깊이 등에 연관이 있다^[6,7].

본 연구에서는 광탄성 효과가 큰 Y-컷 LiNbO_3 을 기판으로 하여 양자교환으로 도파로를 형성하고, 표면음향파를 여기시키기 위하여 광학소자용 미세패턴 제작에 유용한 레이저 사진술(laser lithography) 방식으로 인터디지탈형 전극(interdigital transducer: IDT)을 제작하였다. 그리고, 양자교환에 의한 표면음향파의 특성 저하를 최소화하고 Y-컷에서의 표면손상을 없애기 위해 Y-컷 LiNbO_3 을 매우 짧은 시간동안 양자교환한 후 어닐링(annealing)하는 방식으로 기본 모드 도파로를 형성시켰다. 또한 양자교환에 의한 전기-음향변환 효율의 감소를 완화시키기 위해 전극이 위

치한 부분은 알루미늄으로 마스킹하였다. 위와 같은 방법으로 박막도파 구조형 음향광학 광변위기를 제작하고 그 특성을 측정하고 고찰하였다.

II. 음향광학 효과

음향광학이란 매질내에서 빛과 음향파의 상호작용을 다루는 것이다. 빛과 음향파의 상호작용에 관한 현상 중에서 가장 중요한 것의 하나가 음향파에 의해 교란된 매질에서 빛의 회절이다.

표면이 균일한 압전물질(piezoelectric material) 위에 전극을 만들어 전기신호를 가하면 스트레스가 생기게 되고 이 스트레스에 의해서 표면음향파가 매질의 표면을 따라 진행하게 된다. 이 진행하는 표면음향파가 매질에 스트레인을 가하여 주기적인 굴절을 변화를 초래하게 된다. 이를 음향광학효과(acousto-optic effect)라 한다. 매질내를 진행하는 표면음향파의 속도가 그곳을 통과하는 빛의 속도에 비해서 매우 작기 때문에 이 음향탄성파에 의해서 생긴 주기적인 굴절을 변화는 정적인 회절격자 역할을 하게 된다. 이 회절격자에 의해서 그곳을 통과하는 빛이 회절하게 된다. 음향광학효과는 식 (1)과 같다^[11].

$$\Delta \left[\frac{1}{n^2} \right]_i = P_{ij} s_j \quad (1)$$

여기서 $\Delta [1/n^2]_i$ 는 광 비투자율 텐서(optical impermeability tensor)의 변화량을 의미하고, P_{ij} 는 광탄성계수(photoelastic coefficient), s_j 는 스트레인(strain)이다.

빛과 음향파의 상호작용 현상은 라만-내쓰(Raman-Nath) 회절과 브래그(Bragg) 회절로 대별되며 그 구분 기준은 식 (2)로 정의되는 Q의 대소에 의해서 정의된다^[11].

$$Q = \frac{2\pi \lambda_0 L}{n \Lambda^2} \quad (2)$$

여기서 λ_0 는 자유공간에서의 빛의 파장, Λ 는 매질에서의 음향파의 파장, n 은 매질의 굴절율, L 은 빛과 음향파의 상호작용 길이이다. Q의 값이 1 이하이면 라만-내쓰 회절영역이고, Q의 값이 1 이상이면 브래그 회절영역에 있으나 통상 Q가 10 이상일때 완전한 브래그 회절영역에 있게 된다. 브래그 회절영역에서는 상호작용 길이가 표면음향파의 파장에 비해서 훨씬 크기

때문에 다중 회절로 하나의 빛만 회절되어 나오게 된다. 그림 1은 박막도파형 음향광학 브래그 회절기의 구조를 보여준다.

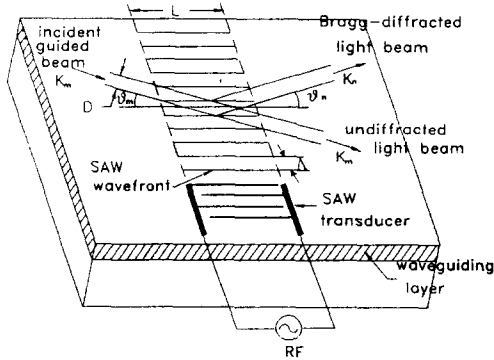


그림 1. 박막도파형 음향광학 브래그 회절기의 구조

Fig. 1. Schematic view of thin film acoustooptic Bragg deflector.

여기서 빛의 입사각과 회절각은 다음 식 (3)으로 주어진다^[8]

$$\sin \theta_m = \frac{\lambda_0}{2n_m \Lambda} \left(1 + \frac{\Lambda^2}{\lambda_0^2} (n_m^2 - n_n^2) \right) \quad (3-a)$$

$$\sin \theta_n = \frac{\lambda_0}{2n_n \Lambda} \left(1 - \frac{\Lambda^2}{\lambda_0^2} (n_m^2 - n_n^2) \right) \quad (3-b)$$

여기서 $n_m (= K_m / K_0)$ 과 $n_n (= K_n / K_0)$ 은 입사광과 회절광의 유효 굴절율을 나타낸다. 특별히 회절된 파의 모드가 변하지 않을 경우 $n_n = n_m = n$ 이 되고 이를 등방성 회절(isotropic diffraction)이라 한다. 이 경우 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\sin \theta_m (= \theta_n) = \frac{\lambda_0}{2n \Lambda}$$

표면음향파(Surface Acoustic Wave : SAW)와 도파된 광파(Guided Optical Wave : GOW)의 상호작용에 의한 브래그 회절은 표면이 균일한 매질위에서 일어난다. 그러므로 이러한 표면음향파를 이용한 박막형 회절은 벌크형 회절에 비해 광파와 표면음향파의 높은 전력 밀도, 긴 상호작용 길이, 넓은 대역폭, 전극 제작에 있어서의 융통성 등 여러가지 장점이 있다. 또한 빛이 도파로에만 도파되고 표면 음향파의 여기를 위한 전극이 표면에 위치하므로 박막도파형 브래그 회절기에서의 회절 특성은 광도파로의 특성과 표면 음향

파의 파장에 밀접하게 연관되어 있다^[9].

박막도파 구조형에서 브래그 회절 효율은 다음 식 (4)로 주어진다^[9].

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I_i} &= \sin^2(x_{id}L) \\ &= \sin^2 \left[\left(\frac{k}{2 \cos \theta_i} \left\{ \frac{P_a}{2HL} \left(\frac{N^6 \rho^2}{\rho v^3} \right) q_{id}^2 \right\}^{1/2} \right) L \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 I_i, I_d 는 각각 입사광의 세기, 회절광의 세기이다. 그리고 P_a 는 표면 음향파의 전력, v 는 표면 음향파의 속도, ρ 는 매질의 질량 밀도이며, N 은 도파로의 유효 굴절율, L 은 상호작용 길이, H 는 표면 음향파의 표면에서의 깊이, k 는 자유공간에서의 빛의 전파상수이다. 그리고 q_{id} 는 다음 식 (5)와 같다.

$$q_{id} = \frac{2k(N_i N_d)^{1/2}}{\omega \mu_0} \int_0^\infty \epsilon_i'(y) \epsilon_d(y) dy \quad (5)$$

q_{id} 는 overlap integral 이라 하며, 이 성분은 도파로 특성과 표면 음향파의 깊이 방향의 세기와 밀접한 관계가 있다. 식 (5)에서 N_i, N_d 각각 입사광과 회절광에 대한 유효굴절율이며 $\epsilon_i'(y), \epsilon_d(y)$ 는 각각 입사광과 회절광의 표면에서 깊이 방향인 y 방향의 전장분포이다. 식 (4)에서 매질의 음향광학 성능을 나타내는 유효 음향광학 성능지수(effective acoustooptic figure of merit)는 식 (6)으로 정의된다.

$$M_{2eff} = \left(\frac{N^6 \rho^2}{\rho v^3} \right) q_{id}^2 \quad (6)$$

이 성능 지수 또한 도파로와 표면 음향파와 연관되어 있음을 알 수 있다. 70%의 회절을 위해서 필요한 음향파의 전력은 식 (4)에서부터 다음과 같이 주어진다.

$$P_a = \frac{\lambda^2 \cos^2 \theta_i}{\pi^2} \frac{1}{M_{2eff}} \frac{2H}{L} \quad (7)$$

식 (4), (7)에서 보면 q_{id} 가 1에 가까워야 높은 효율을 갖게 됨을 알 수 있다. 만약 입사광과 회절광의 모드가 같으면 등방성 브래그 회절이라 하고 이때는 q_{id} 는 1에 가깝다.

음향광학 광변위기의 대역폭은 빛의 전파상수와 음향파의 전파상수 사이의 위상 정합 조건과 전극 자체의 주파수 특성에 의해서 결정된다. 등방성 회절시 빛의 전파상수와 음향파의 전파상수 사이의 위상 정합 조건에 의한 주파수대역폭은 상호작용 길이와 음향파의 주기에 관계되며 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta f = 2n \frac{V}{\lambda_0} \frac{A}{L} \quad (8)$$

전극에 의한 대역폭은 전극의 갯수와 관계되며 다음과 같다.

$$\Delta f_{trans} = \frac{f_c}{N} \quad (9)$$

여기서 f_c 는 광변위기의 동작 중심주파수이고, N 은 전극쌍 갯수이다. 전극쌍이 많아지면 전기-음향변환 효율은 증가되나 대역폭은 감소된다. 광변위기의 전체 주파수특성은 식 (8)과 식 (9)의 곱에 의해서 결정된다. 구별할 수 있는 회절광의 갯수(Number of Resolvable Spots: NRS)는

$$NRS = \Delta f \tau \quad (10)$$

로 주어지며^[9], 여기서 $\tau (= D/v : D$ 는 도파광의 폭)는 음향파가 도파광의 빔폭을 가로지르는데 걸리는 천이 시간이다. 큰 NRS를 얻기 위해서 광의 빔 폭을 크게하여 도파시켜야 한다.

식 (4)에서 보던 회절된 빔의 세기는 표면 음향파의 전력에 따라 변함을 알 수 있다. 그러므로 브래그 회절은 광 변조 기능을 가진다. 최대 변조대역폭은 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta f_{max} = \frac{1}{\tau} = \frac{v}{D} \quad (11)$$

식 (11)에서 넓은 대역폭을 가진 변조기로 동작시킬 경우 빛의 폭을 좁게 해야 함을 알 수 있다. 식 (7), 식 (8)에서 상호작용 길이 L 에 따라 효율과 대역폭이 변하는 것을 볼 수 있다. L 이 길어지면 효율은 좋아지는 반면 대역폭은 좁아진다. 그래서 여러가지 형태의 전극들이 구동 RF신호의 전력을 작게 하기 위해서 또는 큰 대역폭을 얻기 위해서 사용된다.^[5,10,11]

III. 음향광학 광변위기 설계 및 제작

양자교환은 안식향산(benzoic acid: C_6H_5COOH)용액에 기판을 넣어 리튬이온과 양자(H+)를 서로 교환시키는 방법이다. 이는 굴절을 변화를 크게 얻을 수 있고 공정 시간이 짧으며 비교적 낮은 온도와 그 과정이 간단하다는 장점이 있다^[12]. 그러나 양자교환 반응이 급격히 일어나서 제작과정에 불균일성과 제작 후 시간이 지남에 따라 광 특성이 변하는 불안정성을 지닌다

^[12]. 표면 근처에서의 급격한 반응은 표면을 손상시키며, 특히 Y-컷은 기판 자체의 스트레인 완충 능력이 현저히 낮아서 심한 반응시 표면 손상이 매우 커져 많은 수의 균열이 표면에 생긴다^[13]. 이러한 단점을 보완하기 위해 몇가지 방법이 연구되었다.

첫째, 안식향산 용액을 리튬이온으로 완충(buffering)시켜 양자교환 반응을 완화시키는 기술이다^[14]. 이 방법으로 광도파로를 형성하려면 반응시간이 너무 길어지고 용액속의 리튬 이온의 비율에 따라 반응이 민감하게 변하게 된다.

둘째, 적당한 양의 티타늄을 내부확산후 양자교환하는 방식이다^[15]. 이 경우 확산된 티타늄의 양에 따라 표면 손상이 달라진다.

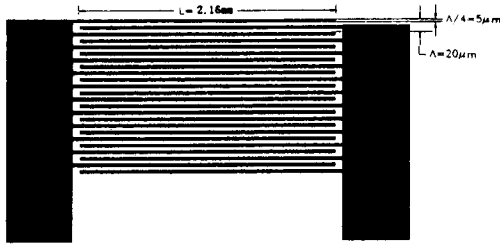
세째는 매우 짧은 시간 동안 양자교환(약 210°C에서 10분까지)후 보다 높은 온도(300-400°C)에서 $LiNbO_3$ 결정내에 교환된 양자를 어닐링하여 표면 근처에 심하게 밀집되어 불안정한 상태로 존재하는 양자들을 내부, 외부 확산시켜 결정의 특성을 안정시키는 방법이다^[6,16]. 이 방식은 저하된 광특성을 회복시키며 시간에 따른 불안정성을 제거시키는 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서도 이 방법을 사용하여 광 도파로를 형성하였다.

양자교환된 Y-컷 $LiNbO_3$ 에서 표면손상은 양자교환 깊이에 크게 좌우된다. 실험 결과치로 Y-컷에 있어서 양자교환 깊이가 2000Å 이하일 경우 표면손상이 없는 것으로 발표되었다^[15]. 순수한 안식향산을 사용하여 양자교환시 양자교환 시간과 온도에 따라 양자교환되는 깊이는 Arrhenius law^[17]에 의해 다음과 같이 주어진다.

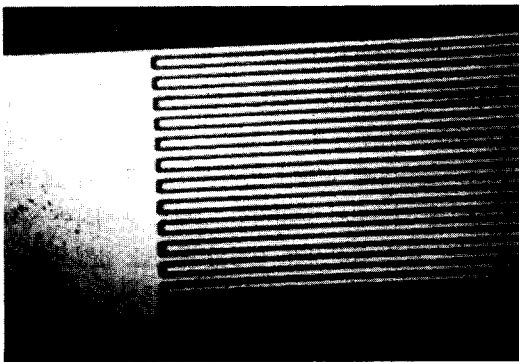
$$D(T) = D_0 \exp(-ET/(KT)) \quad [\mu m^2/t] \quad (12)$$

여기서 $D(T)$ 는 단위 시간당 확산 깊이의 제곱을 의미하는 확산방정식이고, D_0 는 확산계수로서 그 값은 x-컷에서는 $4.93 \times 10^9 [\mu m^2/t]$, y-컷에서는 $6.09 \times 10^9 [\mu m^2/t]$ 이고, z-컷에서는 $3.47 \times 10^9 [\mu m^2/t]$ 이다. $ET = 0.95$ eV이고 K 는 볼츠만 상수이다.

본 논문에서는 표면손상을 없애고 기본 모드 도파로를 만들기 위해 210°C의 순수 안식향산에 3분간 양자교환했으며, 이때 교환된 깊이는 약 1750Å으로 추정된다. 이것을 400°C에서 15분간 산소 분위기하에서 어닐링하여 표면손상이 없고 파장이 632.8nm인 광에 대해 단일모드인 박막형 도파로를 형성하였다.



(a) 광변조기의 전체 전극 구조(검은 부분이 Al 전극임)
 (b) Whole electrode pattern of beam deflector.(black area: Al electrode)



(a) 전극 가장자리 부분(흰 부분이 Al전극임)
 (b) The edge part of electrode pattern.(white area: A: electrode)

그림 2. 전극의 구조와 현미경 사진
 Fig. 2. The electrode pattern and their microscopic view of the SAW transducer.

표면 음향파 여기를 위한 전극을 제작하기 위해 레이저 사진술방식을 사용하여 인터디지털형 전극의 패턴을 형성하였다. 레이저 사진술은 가로 세로비가 크게 차이는 집적광학 소자용 미세패턴을 제작하는데 용이한 방식이다. 전극은 진공증착된 알루미늄이며, 두께는 약 2500Å이다. 양자교환된 Y-컷 LiNbO₃에서 표면 음향파의 속도가 3480 [m/sec]이므로, 광변위기의 구동 RF 신호의 중심 주파수가 174MHz가 되도록 전극의 주기 λ 를 20 μ m로 하였다. 식 (9)에서 전극의 대역폭이 15MHz정도 되게 전극은 12쌍으로 구성하였다. 완전한 브래그회절 영역에서 동작하도록 식 (2)의 Q값이 10이 되게 표면음향파의 폭이 되는 상호작용 길이는 108 λ 로 하였다. 표면음향파가 z방향으로 전파하고 빛이 x방향으로 도파되게 설계했다. 그림 2는 전

극의 전체 형태와 실제 제작된 전극의 현미경 사진이다. 그림 2와 같은 전극의 패턴을 레이저 사진술로 형성할때 레이저 빔이 지나간 자리의 알루미늄을 에칭하였다.

제작된 광 변위기에 단면을 통해 직접 빛을 도파로로 입사시키기 위해 도파로 단면 부분을 연마해야 한다. 연마는 우선 입자가 큰 사포와 연마가루로 깨어진 부분이 없을 때까지 연마한 다음 3 μ m, 1 μ m, 0.3 μ m 알루미늄 가루로 차례로 연마했다.

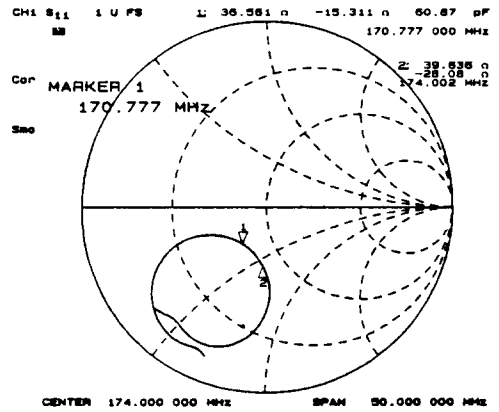


그림 3. 제작된 소자의 전극 임피던스
 Fig. 3. Electrode impedance of the fabricated device.

임피던스 정합 회로 및 패키지 제작의 용이함을 위해 테프론기판에 전극과의 본딩(bonding)을 위한 패드를 만들고 제작된 소자를 이 패드위에 본딩했다.

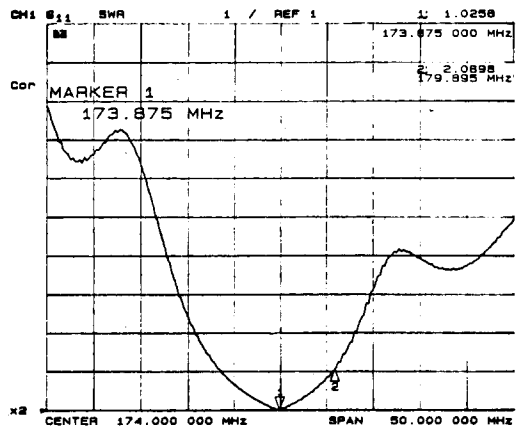


그림 4. 임피던스 정합된 소자의 전압 정재파비
 Fig. 4. Voltage standing wave ratio of the impedance-matched device.

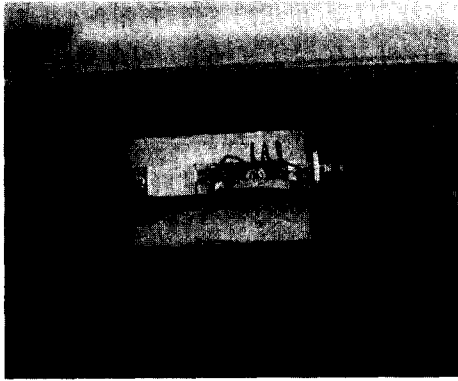


그림 5. 제작된 박막도파형 광 변위기
Fig. 5. The fabricated thin film acoustooptic beam deflector.

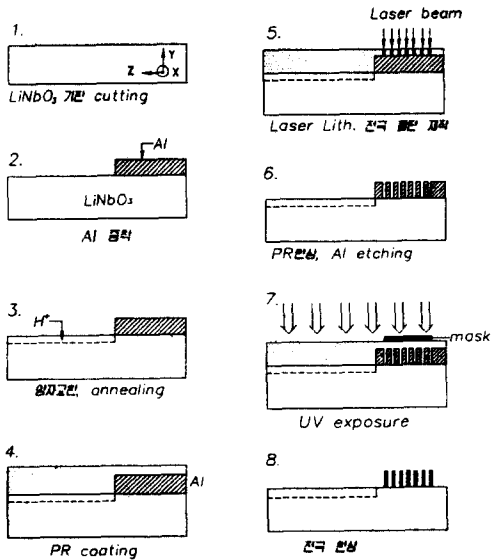


그림 6. 광변위기 주요 제작 과정
Fig. 6. The main fabrication processes for the beam deflector.

황동으로 받침대를 만들어 그 끝단에 RF 신호 인가를 위한 SMA콘넥터를 연결하고, 그 받침대 위에 제작된 소자를 고정시켰다. 또한 표면 음향파가 소자의 양 끝단에서 반사되어 오는 것을 막기 위해 소자의 양 끝단에 흡수체로서 실리콘 본드를 입혔다.

임피던스 정합을 위해 전극의 용량을 측정하였다. 네트워크 분석기로 측정한 전극의 임피던스를 그림 3에 보여준다. 그림 3에서 보면 174MHz에서 전극의 임피던스는 32.57pF이다. 그래서 전극과 SMA단자

사이에 임피던스 정합을 위해 25.6nH의 인덕터를 연결하였다. 그림 4는 임피던스 정합되었을 때의 전압정재파비를 나타낸다. 여기서 보면 173.875MHz에서는 정확하게 정합되었으나 약 15MHz범위 내에서만 전압정재파비가 2이하임을 볼 수 있다. 그림 5는 완성된 광 변위기의 실물 사진이다. 그림 6은 광변위기 제작과정중 주요부분을 보여주고 있다. 제작과정 중 일곱번째에서 마스크는 인터디지탈 전극부분 외에 알루미늄이 남아있는 것을 제거하기 위해 사용하였다.

IV. 광 변위기의 특성 측정 및 고찰

제작된 광 변위기의 도파로의 도파 특성을 측정하기 위해 그림 7과 같은 장치를 구성하였다. 소자의 도파로는 양자교환 방식에 의해 형성되었기 때문에 도파로 내에서는 TE모드만 존재할 수 있다. 따라서 레이저 출력을 편파기로서 TE편파를 만들었다. 그림 8은 제작된 도파로 도파 빔 모양을 보여준다. 그림 8에서 보면 위쪽의 띠모양이 도파로를 통과한 빛이고 빛의 일부는 입사쪽 렌즈의 초점에서 스폿의 크기때문에 기판으로 그냥 통과한 빛이다. 이 빔 모양으로 도파로는 TE₀ 모드만 존재하는 단일모드 평면 도파로임을 알 수 있다.

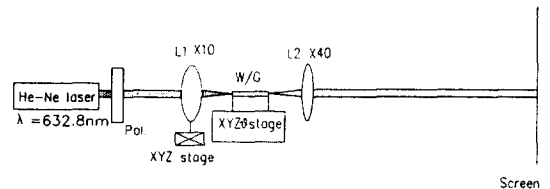


그림 7. 도파모드 측정 장치 구성도
Fig. 7. Experimental setup for measurement guiding mode.

제작된 광변위기의 회절특성을 측정하기 위하여 그림 9와 같은 장치를 구성했다. 파장 632.8nm인 He-Ne 레이저 빔을 광원으로 TE 편광된 빔을 입사시켜 구동 RF신호 전력에 따른 회절광의 강도를 관찰하여 효율을 측정하고, 중심주파수에서부터 점차로 주파수를 변화시키면서 회절광의 강도가 반으로 떨어지는 주파수를 관찰함으로써 3dB 주파수 대역폭을 측정하였다. 제작된 광변위기의 동작 중심주파수는 174MHz이고, 이때의 브래그 각은 0.4°이다.

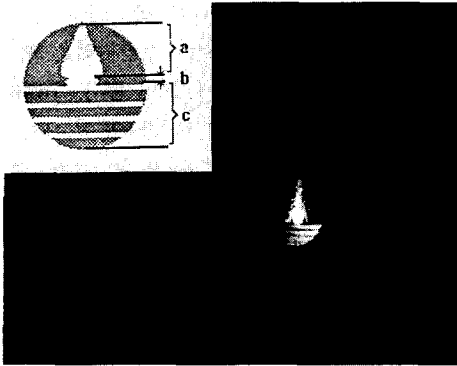


그림 8. 제작된 광변위기의 도파 빔 모양
 (a) 기판을 통해 진행한 빔, (b) 도파로 출력빔, (c)기판윗면에서 산란된 빔
 Fig. 8. Guided beam pattern of the fabricated beam deflector.
 (a)beam guided through the substrate, (b) Waveguide output beam, (c) beam scattered from the top of substrate

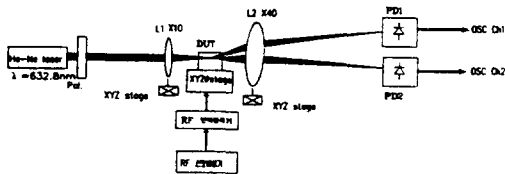


그림 9. 광변위기 회절특성 측정장치 구성도
 Fig. 9. Experimental setup for measurement of beam deflector diffraction characteristics.

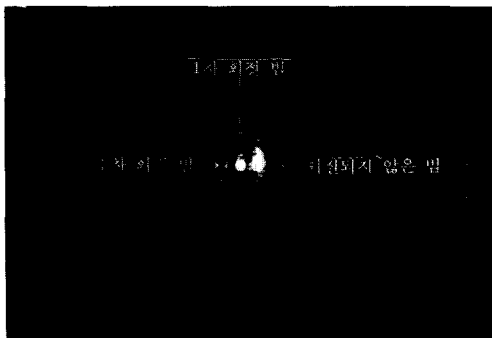


그림 10. 광변위기 출력빔 패턴
 Fig. 10. Output beam pattern for beam deflector.

그림 10은 주파수 174MHz인 RF신호를 인가하였을 때의 출력 빔의 사진이다. 오른쪽 빔이 회절하지 않

고 직접 통과한 빔이고, 왼쪽 두 빔은 1차 회절된 빔과 약간의 2차 회절 빔이다. 이때 출력되는 광파의 편파상태는 처음과 같이 TE 편파이다. 주파수 대역폭을 측정하기 위해서 RF 신호를 HP 8350A 스위프 발진기를 사용하여 150MHz에서 200MHz까지 0.2초 동안 스위프 시켰으며, 회절된 빔을 포토다이오드로 측정하여 그 전압이 최대치에서 반으로 떨어지는 주파수를 측정하였다.

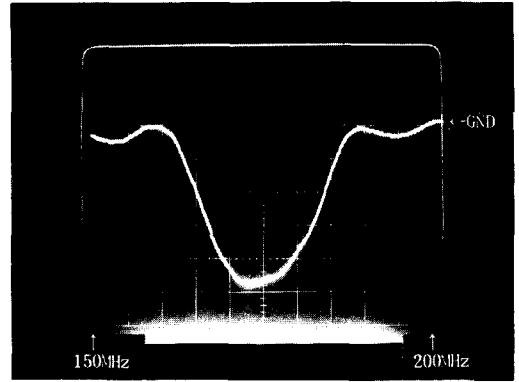


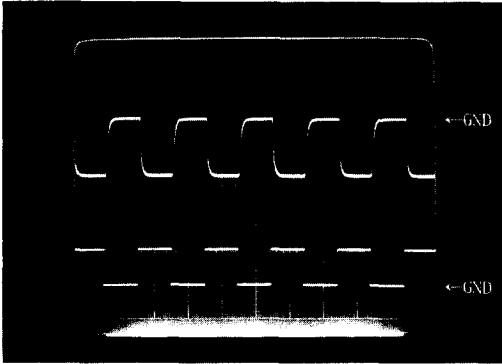
그림 11. 광변위기의 주파수 특성(주파수범위:150-200MHz, 5MHz div) 변위된 빛의 세기(역상) 대 스캐닝 주파수
 Fig. 11. Frequency characteristics of beam deflector. (Frequency range: 150-200MHz, 5MHz/div) Deflected light intensity (inverted) vs. scanning frequency.

그림 11은 오실로스코프로 3dB 주파수 대역폭을 측정한 파형이다. 전체 주파수 범위는 150-200MHz이고 전압이 반으로 떨어지는 주파수는 각각 166MHz, 183MHz로 주파수 대역폭은 17MHz이다. 만약 제작된 전극주기가 설계치와 일치하지 않으면 회절효과가 원하는 주파수에서 일어나지 않는다. 이때 소자의 온도를 가변함으로써 표면음향파의 속도를 조절하여 원하는 주파수에서 가장 높은 회절효율을 얻을 수 있다.

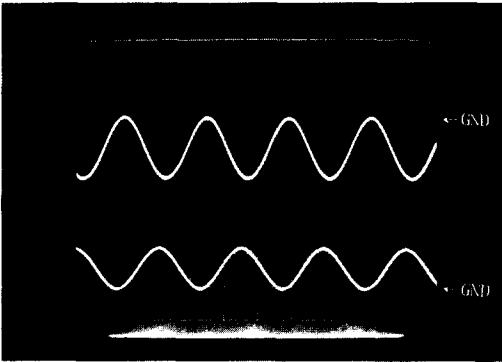
광 변위기의 변조특성을 측정하기 위하여 RF신호 입력단에 중심주파수 174MHz로 사인파와 구형파를 진폭변조한 신호를 인가했다. 변조된 광의 검출을 위해 Liconix사의 Model 40D 광검출기를 사용했다. 이러한 방법으로 광변위기의 변조특성을 오실로스코프로 관찰한 파형이 그림 12이다.

그림에서 아래 파형은 변조된 전기적 신호이고 위쪽 파형은 회절된 빔의 광 검출기 출력 파형이다. 그림

12에서 보면 진폭 변조된 RF신호에 따라 회절된 빔이 변조됨을 알 수 있다.



(a) 구형파 전기신호에 대한 광변조 특성



(b) 사인파 전기신호에 대한 광변조 특성

그림 12. 광변위기의 변조 특성
 위 파형: 1차 회절 빔(5mV/div),
 아래파형: 전기입력신호(5V/div),
 20μsec/div

Fig. 12. Modulation characteristics of the fabricated beam deflector.
 top: First diffracted beam (5mV/div),
 bottom: electric input signal (5V/div), 20μsec/div.

그림 12에서 보는 바와 같이 낮은 주파수의 구형파에서도 검출된 빔이 왜곡되는데 이는 포토다이오드의 응답 시간 지연이다. 식 (7)에서 알 수 있는 바와 같이 변조 대역폭을 크게 하기 위해서는 빛의 폭을 작게 하여 도파시켜야 한다.

회절 효율을 측정하기 위해서 구동 RF신호의 전력을 변화시키면서 이에 따른 회절된 빔의 세기를 측정

하였다. 그림 13은 제작된 광변위기의 회절특성을 보여준다.

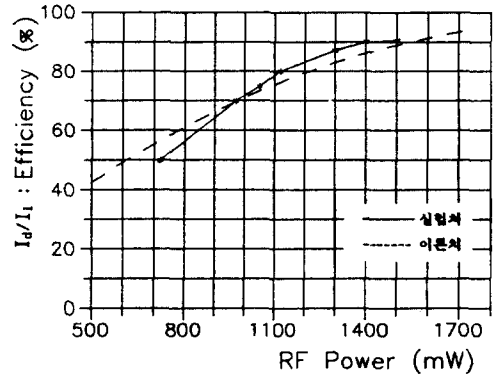


그림 13. 회절효율 대 구동 RF신호 전력

Fig. 13. Diffraction efficiency versus driving RF signal power

그림 13에서 이론치는 식 (4)의 회절효율을 표면 음향파 전력의 제곱근만의 함수로 표현하여 계산한 것이다. 즉 $I_d/I_i = \sin^2(const. P_o^{1/2})$ 가 된다. 그림 13에서 보면 최대 90%까지 회절이 일어나며 70%회절에 필요한 RF구동 전력은 약 970mW임을 알 수 있다. 이것은 매우 높은 전력인데 이는 빛을 단면에서 직접 입사 시 출력면에서 길이 방향의 빛의 퍼짐을 조절하기 위해 스폿 크기가 큰 렌즈로 집속시켜 입사시킴에 따라 표면음향파의 깊이방향의 영향권안에 있는 도파로 아래부분을 진행한 빛이 회절에 기여한 결과로 보여진다. 정확한 회절효율을 측정하기 위해서는 프리즘 결합이나 격자 결합 방식을 사용하여 빛을 도파로에만 도파시켜야 한다.

V. 결론

음향광학 효과를 이용하여 외부의 전기적 신호에 의해 광을 변조시키며 전파방향을 변화시키는 도파로형 광변위기를 제작하고 그 특성을 측정하고 고찰하였다. 음향광학계수가 큰 Y-컷 $LiNbO_3$ 을 사용하여 양자교환 시 표면손상을 없애며, 표면 음향파의 전파손실을 줄이고, 표면 음향파와 도파광의 오버랩(overlap)정도를 크게 하기 위해 짧은 시간(210°C에서 3분)동안 양자교환하고, 400°C 산소 분위기하에서 15분 동안 어닐링하는 방식으로 광도파로를 형성하였으며, 양자교환에 의한 전기-음향 변환 효율 감소를 막기 위해 마스크를 사용하여 전극이 위치할 부분에는 양자교환을 하지 않

았다. 전극제작은 집적광학용 미세패턴 제작에 용이한 레이저 사진술 방식으로 주기가 20 μ m인 인터디지탈형 전극을 만들었다.

이러한 제작 방법으로 도파로 단면에 빛을 직접 입사시키는 박막도파 구조형 음향광학 광변위기를 제작하고 그 특성을 측정하였다. 구현된 광변위기는 중심 주파수가 174MHz이고, 이때 브래그 각은 0.4° 였다. 3dB 대역폭은 17MHz였으며, 970mW RF구동 신호에 대해서 70%의 회절효율을 얻었다. 그리고 변조된 RF전기 신호에 대해 회절된 빔이 변조됨을 관측하였으며, 구동 RF신호의 주파수에 따라 회절 방향의 변화를 관측했다. 그러나 단면을 통해 직접 빛을 입사시키는 방식에 따라 입력 및 출력면에서의 산란, 표면 음향파의 깊이방향의 영향권안에 있는 도파로 아래부분을 진행한 빛이 회절에 기여, 그리고 도파로의 빔폭 조절의 어려움 등의 문제점이 있었다. 그래서, 구현된 광변위기를 프리즘 결합 방식이나 격자 결합 방식으로 빛을 도파로에 입사시킨다면 더욱 높은 효율과 더 좋은 변조특성을 가진 소자로, 광변위기 및 변조기 등 광통신분야에 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Amnon Yariv and Pochi Yeh, *Optical Waves in Crystals*, John Wiley, 1984.
- [2] Eric G. H. Lean, James M. White and Christopher D. W. Wilkinson, "Thin film acoustooptic devices", *IEEE-Pro.* vol. 64, pp. 779-788, 1976.
- [3] E. P. Ippen, "Diffraction of light by surface acoustic waves", *IEEE-Pro.* vol. 55, pp. 248-249, 1967.
- [4] L. Kuhn, M. L. Dakss, et. al., "Deflection of an optical guided wave by surface acoustic wave", *Appl. Phys. Lett.* vol. 17, pp. 265-267, 1970.
- [5] R. V. Schmidt and I. P. Kaminow, "Acoustooptic Bragg deflection in LiNbO₃ Ti-diffused waveguides", *IEEE-QE.* vol. 11, pp. 57-59, 1975.
- [6] A. L. Dawar, et al., "Guided-wave acousto-optic interaction in proton-exchanged Y-cut LiNbO₃", *Appl. Phys. Lett.* vol. 48, pp. 1579-1581, 1986.
- [7] Mamoru Miyawaki and Shigetaro Ogura, "Efficient damage resistant LiNbO₃ acousto-optic waveguide deflector", *Appl. Phys. Lett.* 47., pp. 918-920, 1985.
- [8] Yoshiro Ohmachi, "Acousto-optical light diffraction in thin film", *J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 3928-3933, 1973.
- [9] Ronald V. Schmidt, "Acoustooptic interaction between guided optical waves and acoustic surface waves", *IEEE-SU.* vol. 23, pp. 22-33, 1976.
- [10] L. T. Nguyen and C. S. Tsai, "Efficient wideband guided-wave acousto-optic Bragg diffraction using phased acoustic wave array in LiNbO₃", *Appl. opt.*, vol. 16, pp. 1297-1304, 1977.
- [11] C. S. Tsai, et al., "High-performance acousto-optic guided-light-beam device using two tilting surface acoustic waves", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, pp. 140-142, 1975.
- [12] A. Yi-Yan, "Index instability in proton-exchanged LiNbO₃ waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 42, pp. 633-635, 1983.
- [13] M. Goodwin and C. Stewart, "Proton-exchanged optical waveguides in Y-cut lithium niobate", *Electron. Lett.*, vol. 19, pp. 223-225, 1983.
- [14] J. L. Jackel, et al., "Composition control in proton-exchanged LiNbO₃", *Electron. Lett.*, vol. 19, pp. 387-388, 1983.
- [15] A. Campari, et al., "Strain and surface damage by proton exchange in Y-cut LiNbO₃", *J. Appl. Phys.* vol. 58, pp. 4521-4524, 1985.
- [16] S. -Y. Shin, "Integrated optical sensor of Mach-Zehnder interferometric type", *Optical Measurement and Control (II)*, pp 68-84, KOSEF, 1991.
- [17] C. Canali et al., "Structural characterization of proton exchanged LiNbO₃ optical waveguides", *J. Appl. Phys.*, vol.

59, pp. 2643-2649, 1986.

저 자 소 개



金 成 國(正會員)

1962년 12월 26일생. 1985년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1991년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사

과정 재학중. 주관심 분야는 광통신, 집적광학, 센서 시스템 등임



白 雲 碩(正會員)

1960년 1월 3일생. 1982년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 2월 경북대학교 대학원 전자 공학과 졸업(공학석사). 1988년 2월 ~ 현재 국방과학연구소 선임연구원.주관심 분야는EMI

/EMC, 집적광학 등임.



金 光 鐸(正會員)

1966년 3월 20일생. 1989년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1991년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1991년 3월 ~ 현재 포항가속기 연구소 근무중. 1994년

3월 ~ 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 광통신, 집적광학, 초고주파증폭기 등임



鄭 成 甲(正會員)

1966년 5월 26일생. 1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1993년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993 ~현재 LG전자 영상미디어 연구소 주임연구원. 주관심 분야는

광통신, 집적광학등임



宋 在 元(正會員)

1955년 11월 6일생. 1978년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1984년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공

학과 졸업(공학박사). 1984년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자공학과, 부교수. 1995년 현재 경북대학교 전자계산소 소장. 주관심 분야는 광통신, 집적광학 등임