

Zn-Vapor 확산에 의한 Ti:LiTaO₃ 광도파로의 굴절률 증가에 관한 연구

논문
9-3-10

A Study on the Enhancement of Refractive Index in Ti:LiTaO₃ Optical Waveguides by Zn-Vapor Diffusion

정 홍 식*, 정 영 식**

(Hong-Sik Jung, Young Sik Chung)

Abstract

A double diffusion technique is developed to enhance the effective mode index of optical waveguides in LiTaO₃. It consists of Zn diffusion from the vapor phase at relatively low temperatures (750-800°C), into waveguides initially produced by Ti indiffusion at higher temperature (1150-1200°C). Both X- and Z-cut substrates are investigated. A model that combines profiles of both diffusion is formulated to calculate the expected effective index values for planar waveguides. Good agreement is found between experimental results and model predictions which assume that the initial Ti profile is not affected by the lower temperature Zn diffusion. Effective index enhancements as high as 0.005 and 0.003 are obtained by this method for the fundamental extraordinary and ordinary modes, respectively.

Key Words(중요용어) : Optical Waveguide(광도파로), Optical Integrated Circuit(광집적소자), Prism Coupling(프리즘 결합), Normalized b-V Curve(정규화 b-V 분산 곡선), Ti-diffusion(Ti 확산), Zn-Vapor Diffusion(Zn 기체 확산)

1. 서 론

광집적소자(optical intergrated circuits)를 구성하는 기본 단위소자인 광도파로(optical waveguide)의 유효 굴절률(effective refractive index)을 조절하는 방법에 대해서 오래전부터 많은 관심과 연구가 진행되어져 왔다. 특히, LiNbO₃(Lithium Niobate)와 Glass 광도파로에 그러한 효과를 얻는 여러 방법들이 보고되었다. LiNbO₃에 제작된 광집적소자와 광섬유의 연결부분에서 결합손실(coupling loss)을 줄이기 위해 광섬유와 연결되는 광도파로의 끝부분을 Taper형태로 설계한 다음, 이 부분의 굴절률을 적절하게 증가시키기 위해서 Ti 박막의 두께 및 폭을 조절하여 제작하였다.¹⁻⁴⁾ Neyer는 2단계 Ti 증착 방법을 이용해서 X-스위치의

교차부분에서 굴절률을 증가시켜, 방사(radiation) 손실을 줄일 수가 있었다.⁵⁾ Alferness와 Schmidt는 ion-beam 식각방법을 이용해서 평행 광도파로가 서로 다른 굴절률을 갖도록하여 tunable coupled waveguide filter를 제작하였다.⁶⁾ 한편 Ti/Mg 이중 확산방법을 이용해서 결합손실을 줄일 수 있는 방법도 보고되었다.⁷⁾

LiNbO₃와 더불어 광집적소자 분야에서, 매우 큰 광손상 임계값(optical damage susceptibility)과 작은 복굴절률(birefringence) 특성 때문에 많은 관심의 대상이 되고 있는 LiTaO₃(Lithium Tantalate)에 대해서는 1단계 확산방법 이외에는 광도파로의 굴절률 증가를 조절할 수 있는 2단계 확산방법에 대한 연구는 매우 미약한 수준에 있다. 본 논문에서는 Ti 확산에 의해서 이미 형성된 Ti:LiTaO₃ 평면형 광도파로에 Zn-vapor 확산으로 유효 굴절률을 증가시키는 방법을 제시하고자 한다.⁸⁾ Zn-vapor 확산 단계에서는, 비교적 낮은 온도(750-800°C)에서 Zn를 기체화 상태로 확산이 가능하기 때문에 Ti 확산에 의해서 형성된 광도파로의 유효 확산길

* : 홍익대학교 전자전산공학과

** : 시립인천대학교 전기공학과

접수일자 : 1995년 11월 3일

심사완료 : 1996년 2월 29일

이(effective diffusion depth)에는 영향을 미치지 않고, 단지 굴절률만 증가시킬 수 있었다. Ti/Zn 이중 확산에 의해서 제작된 광도파로에서 유효굴절률을 예측할 수 있는 전산모의실험을 파동방정식(wave equation)을 이용하여 수행하였으며, 계산치가 실험치와 잘 일치하였다.

2. 실험 과정 및 측정

Ti 확산방법으로 LiTaO₃에 평면형 광도파로를 제작하였다. X-, Z-cut LiTaO₃ 기판(14x8.5x1mm)에 DC-Sputter로 Ti을 증착시킨후, dry-O₂ 분위기에서 650°C, 4시간동안 Ti을 TiO₂(titanium oxide)로 산화시켰다. 이어서 1150°C와 1200°C 두 온도에서 TiO₂을 확산시켜서 평면형 광도파로를 제작하였다. 각 샘플에 대한 확산 조건들을 (Ti film 두께 τ , 온도 T 및 시간 t) 표 1에 요약하였다. 모든 확산은 quartz furnace 관에서 수행하였으며, 1000°C 이상의 확산온도에서 Ti 확산과 동시에 기판으로 부터 Li 성분이 빠져나오는 현상 때문에 형성되는 기생(parasite) 도파로를 억제하기 위해서 lithium-vapor 분위기 속에서 Ti 확산을 수행하였다. 0.63 μ m 파장의 He-Ne 레이저를 그림 1과 같이 프리즘(prism)을 통해서 Ti:LiTaO₃ 평면 광도파로에 입사시키는 결합방법을 이용해서 각 도파 모드의 유효굴절률을 측정하였다.

표 1. Ti, Zn-vapor 확산 조건과 평면 광도파로의 유효깊이 (X, Z는 샘플의 절편을 나타내며, e, o는 비정상과 정상 편파를 의미한다.)

Table 1. Diffusion conditions for Ti and Zn-vapor with corresponding effective waveguides depth (X and Z designate substrate cuts, subscripts e, o refer to extraordinary and ordinary polarization)

Sample	Ti Diffusion			Zn Vapor Diffusion				
	τ (Å)	T (°C)	t (hr)	d (um)	T (°C)	t (hr)	d (um)	
X4	e	335	1150	14	2.83	800	6	4.02
	o				2.64			4.24
X5	e	290	1200	9	2.85	750	9	3.03
	o				2.65			3.15
Z5	e	290	1200	9	4.2	750	9	3.50
	o				3.86			2.85

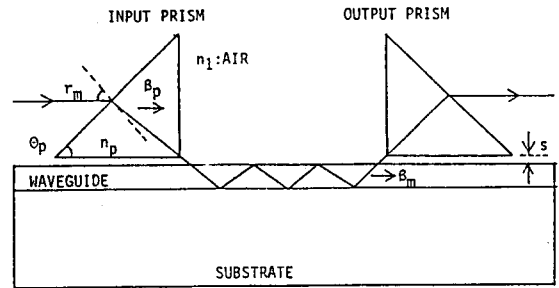


그림 1. 프리즘 결합방법의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of a prism coupling method

Ti 확산에 의해서 증가된 굴절률 분포에 Gaussian 분포함수를 적용하여 유도된 정규화 b-V 분산곡선(normalized b-V dispersion curve)에 측정된 각 모드들의 유효굴절률들을 이용하여 도파로의 유효 확산깊이 d와 표면에서의 굴절률 증가분 Δn_s 를 구하였다.⁹⁾ 자세한 이론적 배경은 본 논문 3장에 요약하였다.

이어서 Zn-vapor 확산방법을 이용해 Ti:LiTaO₃ 광도파로의 유효굴절률을 증가시켰다.⁸⁾ 그림 2와 같이 Zn와 Ti:LiTaO₃ 샘플을 수정 ampule에 삽입시킨 다음 표 1의 확산온도와 시간에 따라 두번째 확산을 시행하였다. 확산하는 동안 ampule 내의

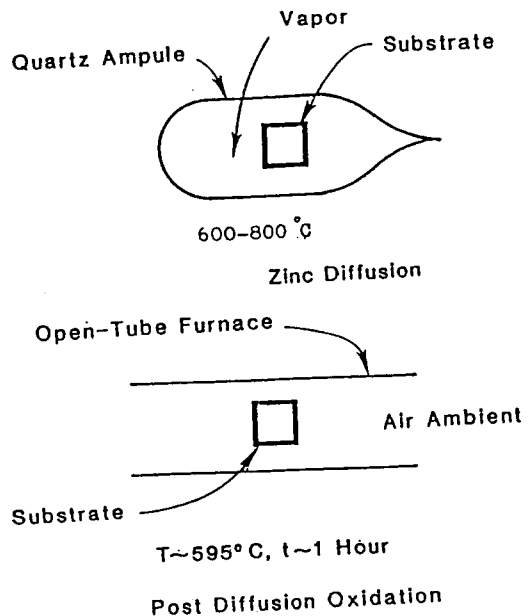


그림 2. Zn-vapor 확산에 이용되는 ampule 구조
Fig. 2. Ampule structure for Zn-vapor diffusion

산소(O₂) 부족 때문에 샘플로부터 산소가 빠져나가서 불투명하게 변화된 샘플을 산소 분위기속에서 650℃, 20분 동안 열처리(annealing) 하여 원상태로 복원시켰다. 앞서 행해진 프리즘 결합 방법을 이용해서, Ti 1차 확산에서 얻은 굴절률보다 더 높은 유효 굴절률을 각 샘플의 기본 모드에서 관찰하였다. 두번째 확산후 각 기본 모드들이 갖는 유효굴절률 $n_{\text{eff}}(\text{Ti}+\text{Zn})$ 와 Zn-vapor 확산에 의해서만 증가된 굴절률양 δn 을 표 2에 요약하였다. 표 2에서 $\Delta n_s(\text{Ti})$ 와 $\Delta n_s(\text{Zn})$ 는 Ti 확산과 Zn-vapor 확산에 의해서만 제작된 광도파로 표면에서의 굴절률 증가분을 의미하며, $n_{\text{eff}}(\text{Ti})$ 는 Ti 1 단계 확산에 의해서만 제작된 광도파로의 기본 모드 유효굴절률을 나타낸 것이다.

표 2. Ti 확산, Ti/Zn-vapor 이중확산으로 제작된 광도파로의 표면 굴절률, 기본 모드의 유효굴절률 그리고 증가분 δn

Table 2. Surface and effective index changes for Ti and Ti/Zn diffusion, and index enhancement Δn of the fundamental mode (Subscripts refer to extraordinary and ordinary polarization)

Sample	$\Delta n_s(\text{Ti})$	$n_{\text{eff}}(\text{Ti})$	$\Delta n_s(\text{Zn})$		δn		
			Measured	Calculated			
X4	e	0.0174	2.1944	0.0086	2.1999	2.2005	0.0055
	o	0.0106	2.1841	0.0038	2.1868	2.1868	0.0027
X5	e	0.0164	2.1936	0.0056	2.1968	2.1971	0.0032
	o	0.011	2.1845	0.0036	2.1864	2.1866	0.0019
Z5	e	0.0122	2.1916	0.00537	2.1947	2.1950	0.0031
	o	0.01	2.1855	0.00324	2.1865	2.1867	0.001

3. 이론적 배경 및 검토

3-1. 광도파로의 모드 분석

Ti:LiTaO₃ 광도파로를 진행하는 광파의 모드 갯수 및 각 모드의 유효굴절률(n_{eff})은 앞서 언급한바와 같이 그림 1과 같은 프리즘 결합 방법에 의해서 측정 가능하다. 결합원리는 다음과 같이 설명될 수 있다. 프리즘의 입사각도 γ_m 을 적당히 변화시킬 경우 프리즘의 n_p/n_1 경계면에서 반사되어 프리즘 안에 형성된 정재파(standing wave)의 전파상수 $\beta_p = (2\pi/\lambda) \cdot n_p \cdot \cos\gamma_m$ 값이 변하게 된다. 따라서 정재파의 전파상수 β_p 가 광도파로 모드의 전파상수 β_m 과 일치될 경우, 프리즘을 통해서 입사된 광파가 광도파로에 결합될 수 있다. 각 모드의 유효

굴절률은 다음과 같이 표현된다.

$$(n_{\text{eff}})_m = \beta_m/k_0 = \sin\gamma_m \cdot \cos\theta_p + \sin\theta_p \cdot (n_p^2 - \sin^2\gamma_m)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 $k_0 = 2\pi/\lambda$, β_m 과 γ_m 은 각 모드의 전파상수와 프리즘의 입사각도를 나타내며, 첨자 m 은 광도파로에 도파되는 각 모드를 의미한다. 즉 $m=0$ 는 기본 모드를 의미한다. 광도파로에 도파되는 각 모드의 굴절률 증가분 $(\Delta n)_m$ 은

$$(\Delta n)_m = (n_{\text{eff}})_m - n_b \quad (2)$$

로 정의되며, n_b 는 차단(cut-off) 모드의 굴절률로서, 프리즘 결합에 의해서 측정가능하다.

Ti 확산과 Zn-vapor 확산에 대한 굴절률 분포로 Gaussian 분포함수와, Complementary error 분포함수가 매우 적합한 것으로 여러 논문에서 입증되었기 때문에, 본 연구에서도 이 분포곡선을 이용해서 정규화 분산곡선(normalized dispersion curve)을 그림 3과 같이 유도하였다.^{8,9)} 이 곡선은 다음과 같이 정의된 두개의 변수, 정규화 유효굴절

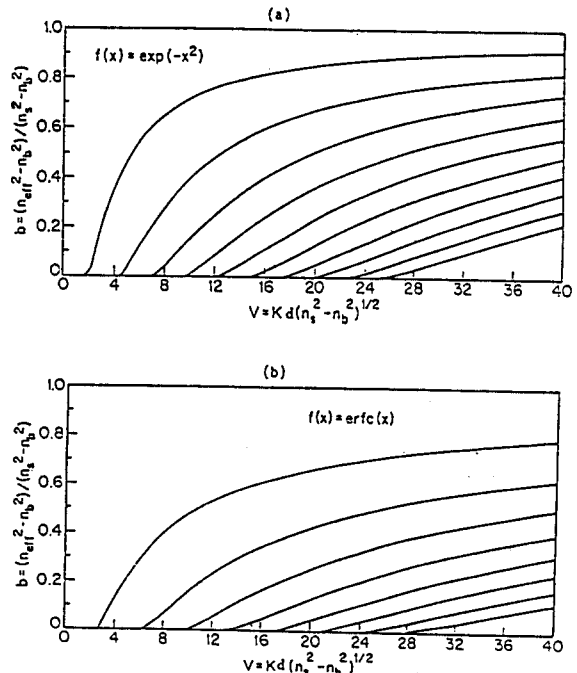


그림 3. 정규화 b-V 모드 분산곡선 (a) Gaussian 굴절률 분포 (b) Complementary error 굴절률 분포

Fig. 3. The normalized dispersion curves for (a) Gaussian index profile. (b) Complementary error index profile

률(normalized effective index) b 와 정규화 확산 깊이가(normalized diffusion depth), V 로 구성되었으며, 다음과 같이 정의된다.

$$b = (n_{\text{eff}}^2 - n_b^2) / (n_s^2 - n_b^2) \quad (3)$$

$$V = k_0 \cdot d \cdot (n_s^2 - n_b^2)^{1/2} \quad (4)$$

여기서 $n_s = n_b + \Delta n_s$ 는 표면에서의 굴절률, d 는 광도파로의 유효 확산깊이를 의미한다. 분산곡선상에서, 프리즘 결합으로 측정된 각 모드의 굴절률 증가분(Δn)_m과 일치되는 b, V 값을 결정한 다음, 이 값들로 부터, 표면 굴절률 증가분 Δn_s 와 유효 확산깊이 d 를 간접적으로 결정할 수 있으며, 관련 식은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta n_s \approx (n_{\text{eff}}^2 - n_b^2) / (2 \cdot b \cdot n_b) \quad (5)$$

$$d = (V/k_0) \cdot (2n_b \cdot \Delta n_s)^{1/2} \quad (6)$$

이와 더불어 확산깊이 $d = 2\sqrt{Dt}$ 로 부터 확산계수(diffusion coefficient), D 를 계산할 수 있으며, 다음과 같은 식을 이용해서 활성화 에너지(activation energy), E_a 와 preexponential factor D^* 를 계산할 수 있다. 여기서 K 는 Boltzmann 상수, T 는 절대 온도를 나타낸다.

$$D(T) = D^* \cdot \exp(-E_a/KT) \quad (7)$$

3-2. 이중 확산형 광도파로의 굴절률 분포

Ti/Zn-vapor 이중 확산후 예상되는 유효 굴절률을 이론적으로 계산하기 위해서 이와같은 확산에 의해서 나타나는 굴절률 분포에 적합한 Wentzel-Kramers-Brillouin(WKB) 방법을 적용하였다.¹⁰⁾ 이중 확산후 도파로에 통과되는 모드의 갯수는 Ti만 확산된 이후 관찰된 모드의 갯수와 거의 동일하기 때문에 상대적으로 낮은 Zn-vapor 확산 온도에서는 Ti에 의해서 형성된 굴절률 분포는 영향을 받지 않으며, 광 도파로의 유효 깊이 또한 변하지 않는다고 생각할 수 있다. 따라서 Ti/Zn 확산후 도파로의 굴절률 분포를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(y) = n_b + \Delta n_T \cdot \exp[-(y/d_T)^2] + \Delta n_Z \cdot \text{erfc}(y/d_Z) \quad (8)$$

위식에서 n_b 는 LiTaO₃의 기본 굴절률이고, Δn_T 와 Δn_Z 는 Ti과 Zn 확산후 표면에서의 굴절률 증가분을 의미하며, d_T 와 d_Z 는 각각 확산 깊이를 나타낸다. Ti와 Zn 확산에 의한 굴절률 변화에 Gaussian과 Complementary Error 분포함수를 적용하였다.

각 모드의 유효 굴절률을 아래에 나타난 파동방정식에 주어진 경계조건을 적용해서 구할 수가 있었다.

$$d^2u/dy^2 + K_c^2(n^2(y) - n_{\text{eff}}^2)u = 0 \quad (9)$$

$$\text{경계조건: } u(0) = 0$$

$$u(y \rightarrow \infty) \sim e^{-\alpha y}$$

여기서 $\alpha = k_0(n_{\text{eff}}^2 - n_b^2)^{1/2}$, $K_c = 2\pi/\lambda$ 로 정의한다. 식 (8)의 굴절률 분포 $n(y)$ 와 비정상편파와 정상편파에 대한 샘플의 굴절률(확산전) $n_b = 2.1833, 2.1786$ 을 식 (9)에 대입해서 기본 모드에 대한 유효 굴절률값을 수치해석적으로 계산하였다. 이 계산과정에서 표 2의 표면 유효굴절률 증가분의 실험 측정값인 $\Delta n_s(\text{Ti}), \Delta n_s(\text{Zn})$ 와 유효 확산깊이 d 를 이용하였다. Zn-vapor 확산에 의해서 증가된 굴절률량 δn 을 표 2에 요약하였다.

Ti 확산에 의해서 얻어진 $\Delta n_T, d, n_{\text{eff}}(\text{Ti})$ 값들을 이용하여 정규화 $b-V$ 분산곡선에 필요한 값들을 계산한 다음, 각 샘플에 대한 결과들을 그림 4에 나타내었다.⁹⁾ Ti/Zn 이중 확산에 대한 b, V 값들도 그림 4에 표시한 결과, Zn 확산에 의한 굴절률 증가를 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 실험치와 식 (8)과

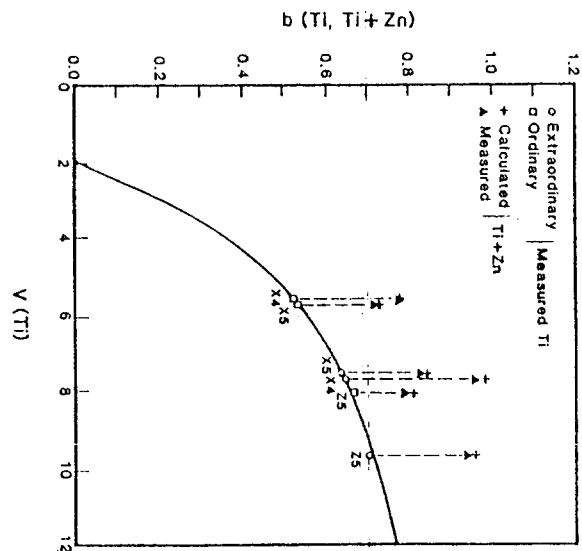


그림 4. Ti 확산, Ti/Zn 확산에 대한 기본 모드의 정규화 $b-V$ 분산곡선 (Gaussian 분포)

Fig. 4. Normalized mode dispersion curve (solid line) for the fundamental mode of a planar waveguide obtained from a Gaussian index distribution.

(9)에서 얻은 계산치와 비교적 잘 일치함은, 앞서 언급한 모델이 이중 확산으로 이루어진 광도파로에 잘 적용됨을 입증하고 있다. 측정치와 계산치 사이의 약간의 오차는 프리즘의 입사각도를 분단위까지 정확하게 측정하기 어렵다는데 기인된다. Zn 확산에 의한 굴절률 증가는 Ti 확산후 차단 (cut-off) 모드에 가까이 존재해서 측정하기가 어려웠던 고차 모드들도 뚜렷한 모드로 관찰할 수 있었다. 비정상편파와 정상편파에서 유효 굴절률의 차이는 오직 비정상 편파에만 영향을 미치는 Li의 out-diffusion에 의한 것으로 생각되며, Ti을 확산시킬때 LiTaO₃의 분말을 사용하여 샘플 주위에 상대적으로 Li이 풍부한 분위기를 만들어, 이러한 영향을 줄일 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

LiTaO₃에서 광도파로의 유효 굴절률을 조절할 수 있는 이중 확산 방법을 개발하였다. Ti 확산에 의해서 이미 형성된 광도파로에 다시 낮은 온도 (~800°C)에서 Zn을 기체 상태로 확산시켜, 광도파로의 유효 굴절률을 증가시켰다. 이중 확산후 기본 모드가 갖는 유효 굴절률을 예측할 수 있는 수치 해석적 모델을 제안하였고, 실험치와 비교적 잘 일치함을 확인 하였다. 이 모델에서 첫 확산에 의한 Ti 분포는 Zn 확산이 이루어지는 동안 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

이 방법을 이용하여, LiTaO₃ 기판에 서로 다른 굴절률을 갖는 두 채널(channel) 도파로를 제작할 때 특히 유용하며, 파장여파기, 주파수 변환기, 다중 및 역다중에 관계되는 광직접소자 제작에 이용될 수 있으리라 생각된다. 또한 X-스위치의 집합 부분, 광섬유와 도파로의 연결부분에서 방사손실을 줄이고, 모드정합을 시킬때 유용하게 응용될 수 있으리라 생각된다.

5. 참 고 문 헌

1. W.K.Burns, A.F.Milton and A.B.Lee, "Optical Waveguide Parabolic Coupling Horns", Appl. Phys. Lett., vol. 30, pp. 28-30, Jan. 1977.
2. M. Kondo, K.Komatsu and Y. Ohta, "Fiber-Coupling Loss and Drive Voltage Simultaneous Reductions by Tapered Titanium Thickness Diffusion in LiNbO₃ Waveguide Switches", in IGWO '84 Conf. Tech. Dig. (Kissimmee, FL.), pp. TuA5-1-TuA5-4, Apr. 1984
3. P.G.Suchoski and R.V.Ramaswamy, "Constant-Width Variable-Index Transition for Efficient Ti:LiNbO₃ Waveguide Fiber Coupling", J. Light Wave Technol., vol LT-5, pp. 1246-1251, Sept. 1987.
4. J.C. Campbell, "Tapered Waveguides for Guided Wave Optics", Appl. Opt., vol. 18, pp. 900-902, Mar. 1979.
5. A. Neyer, W. Mevenkamp, and B. Kretschmann, "Nonblocking 4x4 Switch Array with Sixteen X-Switches in Ti:LiNbO₃", in IGWO '86 Conf. Tech. Dig. (Atlanta, G.A), p.4, Feb. 1986.
6. R.C.Alferness and R.V.Schmidt, "Tunable Optical Waveguide Directional Coupler Filter", Appl. Phys. Lett., vol. 33, pp.161-163, July 1978.
7. K.Komatsu, S.Yamazaki, M.Konde and Y. Ohta, "Low-Loss Broad-Band LiNbO₃ Guided-Wave Phase Modulators Using Titanium/Magnesium Double Diffusion Method", J.Lightwave Technol., vol. LT-5, pp. 1239-1245, Sept. 1987.
8. O.Eknayan, D.W.Yoon and H.F.Taylor, "Low-Loss Optical Waveguides in Lithium Tantalate by Vapor Diffusion", Appl. Phys. Lett., vol. 51, pp. 384-386, Aug. 1987.
9. G.B.Hocker and W.K.Burns, "Modes in Diffused Optical Waveguides of Arbitrary Index Profile", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-11, pp. 270-276, June 1975.
10. R.H.Dicke and J.P.Wittke, "Introduction to Quantum Mechanics" (Addison-Wesley, Reading, MA., pp. 245-248, 1960.

저자소개



정홍식

1959년 6월 25일생. 1982년 2월 1984년 8월 서강대학교 전자공학과 및 대학원 졸업. 1984년 8월-1988년 12월 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학). ... 1989년 3월-1990년 2월 일본 신기술사업단 연구원(Nishizawa's Terahertz

Project). 1990년 3월-현재 홍익대학교 전자전산공학과 부교수.



정영식

1958년 2월 14일생. 1983년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1985년 4월 Univ. of Pittsburgh 전기공학과 졸업(석사). 1990년 8월 Univ. of Pittsburgh 전기공학과(공학). 현재 인천대학교 전기공학과 부교수.