

이온 교환 채널 유리 도파로의 도파광 분포특성

논문
8-3-12

The Guided Field Distribution Characteristics in the Ion-Exchange Channel Glass Waveguide.

박정일¹, 박태성², 천석표³, 정홍배⁴

(J.I.Park, T.S.Park, S.P.Chun, H.B.Chung)

Abstract

In this paper, it was investigated the guided field intensity distribution of the channel in the silver & potassium ion-exchange glass-waveguide.

The guided field intensity distribution analysis of ion-exchange glass-waveguide was based on the combination of the WKB dispersion relationship method with a Gaussian distribution function of refractive index profile and the Field Shadow method to the modeling of the channel waveguide.

As the results of the channel waveguide modeling, it was represented 2-dimensional and 3-dimensional field distribution of ion-exchange glass waveguide.

Key Words(중요용어) : Ion-Exchange(이온교환), Channel Glass Waveguide(채널유리도파로), Planar Waveguide(평면도파로), WKB Dispersion(WKB분산)

제 1 장 서 론

이온교환 광도파로는 광에너지에 대한 안전성, 광섬유와의 낮은 접속손실, 비교적 간단한 제조 공정, 낮은 제작비용, N.A(Numerical Aperture)선택의 용이함 등으로 광수동부품(광분파기, 광결합기, Grin rod lens)^{1),2)}으로의 응용에 대해 많은 연구가 지속되고 있다.

광수동부품은 광섬유형과 도파로(waveguide)형으로 구분될 수 있고 광섬유형에 비해 도파로형은 대량생산이나 집적도면에서 상당한 잇점을 갖고 있다. 도파로를 구성하는 방법으로는 i) Si 기판 위에 Silicate의 형성³⁾, ii) GaAs 및 InP 등과 같은 III-V 화합물 반도체 기판 위의 선택적 성장⁴⁾, iii) Ti가 확산된 LiNbO₃ 기판^{5),6)}, iv) 유리 이온교환을 통한 도파로의 형성⁷⁾등이 있다.

이온교환에 의해 제작된 도파로는 Li⁺, Cs⁺, Rb⁺, K⁺, Ag⁺ 그리고 Tl⁺와 같은 1가의 알카리 이온과 유리내의 Na⁺ 이온이 교환됨으로서 유리 표면의 굴절율이 증가되어 도파로를 구성하게 된다. 굴절율 변화는 다음의 두가지 효과에 의해서 발생되며 첫째는 Li⁺이온과 같은 작은 이온이 Na⁺, K⁺ 같은 큰 이온과 교환되므로 유리 표면에 충전구조를 발생시켜 굴절율을 증가시키며, 둘째는 전자분극율(electronic polarizability)이 큰 이온(Tl⁺, Cs⁺, Ag⁺, Rb⁺, K⁺)이 작은 분극율⁸⁾을 갖는 이온(Na⁺)과 교환됨으로서 굴절율 변화를 발생시킨다. 두 효과 중에서 굴절율 변화는 전자분극율에 크게 의존하게 된다. 교환되는 이온으로서 silver는 유리표면에서 큰 굴절율 변화를 얻을 수 있는 장점^{9),10)}으로 많은 연구 대상이 되어 왔으나, 교환 과정 중 Fe²⁺와 As³⁺와 같은 준안정상态(metastable state)의 이온들의 도너(donor)역할로 인해 silver metal이 형성되어 큰 도파손실을 발생시키는 단점을 갖고 있다. 그러므로 이러한 도파 손실을 줄이고자 silver 이온을 희석시켜 도파로를 제작함으로써 silver

* : 광운대학교 공대 전자재료공학과

접수일자 : 1995년 1월 18일

심사완료 : 1994년 4월 10일

effective depth, d 를 얻을 수 있다.

$$k_0 d \int_0^{\xi_1} \sqrt{n(\xi)^2 - N^2} d\xi = m\pi + \frac{\pi}{4} + \varphi_0 \quad (8)$$

$$d = \frac{m\pi + \frac{\pi}{4} + \arctan\left[\left(\frac{N^2 - n_c^2}{n_s^2 - N^2}\right)^{1/2}\right]}{k_0 \int_0^{\xi_1} \sqrt{n(\xi)^2 - N^2} d\xi} \quad (9)$$

또한 이온교환 채널 도파로의 해석을 위해 rectangular embedded waveguide를 가정하였으며, 이때 대부분의 에너지는 도파로 내부에 존재하여 아주 작은 에너지만이 corner 영역(field shadow region)에 존재 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 corner 영역을 고려하지 않는 Field Shadow Method를 사용하여 도파로를 해석하고자 한다.

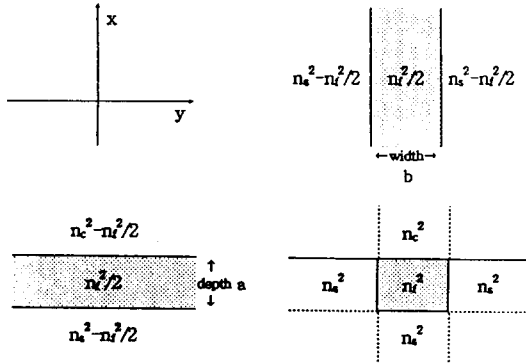


그림 2. 채널 도파로의 x-y 단면도

Fig. 2. x-y Cross Section of Channel Waveguide

그림2에서 각각의 축을 기준으로 각 영역에서의 굴절율은 식(10a)와 식(10b)와 같으며, 이때 채널 도파로에서의 굴절율은 식(10c)와 같다.

$$\begin{aligned} 0 < x < \frac{b}{2} : n^2(x) &= n_c^2 - n_f^2/2 \\ -a < x < 0 : n^2(x) &= n_f^2/2 \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} -a > x : n^2(x) &= n_s^2 - n_c^2/2 \\ |y| < \frac{b}{2} : n^2(y) &= n_f^2/2 \end{aligned} \quad (10b)$$

$$|y| > \frac{b}{2} : n^2(y) = n_s^2 - n_f^2/2$$

$$n^2(x, y) = n^2(x) + n^2(y) \quad (10c)$$

식(11)은 scalar wave eq.이며 이것을 변수분리법에 의해 x 와 y 에 대한 eq.으로 분리하면 식(12a)와 (12b)가 되며 이 두 수식은 각 축에 대한 scalar wave eq.을 나타낸다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + [k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2] \psi = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + [n^2(x)k_0^2 - \beta_1^2] X = 0 \quad (12a)$$

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + [n^2(y)k_0^2 - \beta_2^2] Y = 0 \quad (12b)$$

식(12a)에 각 영역에 대한 굴절을 값을 대입하여 정리하면 식(13)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 X}{d\eta^2} - (V_1^2 - \mu_1^2) X &= 0 ; \eta \leq 0 \\ \frac{d^2 X}{d\eta^2} + \mu_1^2 X &= 0 ; 0 \leq \eta \leq 1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{d^2 X}{d\eta^2} - (V_2^2 - \mu_1^2) X = 0 ; \eta \geq 1$$

여기서 정의된 각 함수는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{x}{a}, \quad V_1 = \frac{k_0}{a} (n_f^2 - n_c^2)^{1/2},$$

$$V_2 = \frac{k_0}{a} (n_f^2 - n_s^2)^{1/2}, \quad \mu_1 = \frac{1}{a} (k_0^2 n_f^2/2 - \beta^2)^{1/2}$$

식(13)의 각 영역에서의 scalar wave eq.의 해는 식(14)로 나타낼 수 있고 $\eta \leq 0$ 과 $\eta \geq 1$ 영역에서 지수함수적으로 증가하는 해는 무시된다.

$$X(x) = A \exp\left[(V_1^2 - \mu_1^2)^{1/2} \eta \right] ; \eta \geq 0$$

$$B \exp\left[i\mu_1 \eta \right] + C \exp\left[-i\mu_1 \eta \right] ; -1 \leq \eta \leq 0$$

$$D \exp\left[(V_2^2 - \mu_1^2)^{1/2} \eta \right] ; \eta \leq -1 \quad (14)$$

$\eta = 0, \eta = 1$ 에서 $X(x)$ 와 $dX(x)/d\eta$ 는 연속적이라는 경계조건을 적용하여 field pattern과 전파상수를 결정하는 transcendental eq.을 얻는다.

X 축의 field pattern은 다음과 같다.

metal의 형성을 억제하는 제작 방법등이 연구되고 있다¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 교환 이온의 종류와 이온 교환 시간등에 따른 도파 특성의 해석을 위해 평면 도파로에서의 가능한 도파모드의 설정과 gaussian field 분포의 도파광을 가정하고, 평면 도파로에서의 effective depth를 WKB method를 통해 예측하고자 한다. 또한, Field Shadow method에 의한 대칭모드와 비대칭 모드에 따른 channel waveguide의 2차원 및 3차원 도파광의 Field 분포를 나타내고자 한다.

제 2 장 이 론

확산에 의해 제작된 평면 도파로와 rectangular 도파로로 가정된 이온 교환 채널 도파로의 해석은 다음과 같다. 본 연구에서는 확산형 평면 도파로의 실효깊이(effective depth) 예측을 위해 WKB method를 이용하였고, 이외의 해석 방법으로는 Effective index method, FEM (Finite Element Method)등이 사용되고 있다. 확산형 도파로의 굴절률 분포는 식(1)의 형태로 표현된다.

$$n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot f(\xi) \quad (1)$$

n_b 는 Bulk 굴절률이며, 분포함수 $f(\xi)$ 는 Erfc, Gaussian, Exponential 함수를 포함한다.

Gaussian : $n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot \exp(-\xi^2)$

Exponential : $n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot \exp(-|\xi|)$

Erfc : $n(\xi) = n_b + \Delta n \cdot \text{Erfc}(\xi) \quad (2)$

이때 각 parameter를 나타내면 다음과 같다.
 $\Delta n = n_s - n_b$, $n_s = \text{Surface index}$, $\xi = x/d$:
 Normalized effective depth

$$\text{Erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} \exp(-y^2) dy \quad (3)$$

확산형 도파로에서 ray trajectory는 graded index분포 때문에 arc wave path를 갖는다. 또한 입사각 θ_i 도 ray가 z방향으로 진행함에 따라 식(4)에 의해 변화된다.

$$\theta_i = \cos^{-1}\left(\frac{N}{n(x_i)}\right) \quad (4)$$

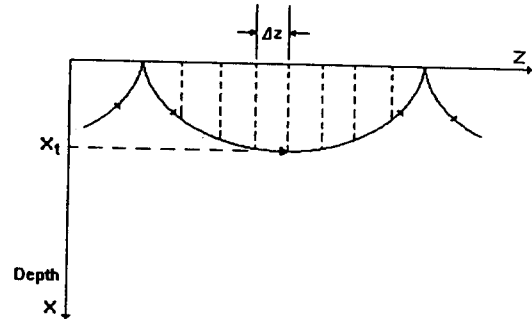


그림 1. Gaussian 분포 함수에 따른 도파광의 경로

Fig. 1. Trajectory of guided optical ray with Gaussian distribution

여기서 i번째 segment의 깊이를 나타내면 $\Delta x_i = \Delta z \cdot \tan \theta_i$ 이 되며 만일 식(4)의 입사각 $\theta_i = 0$ 이 되면 $n(x_i) = N$ 이 된다. 여기서 x_i 는 normalized turning point이며 N은 모드의 실효 굴절률이다.

일반적으로 빛은 경계면에서 반사될때 Goos-Hanchen Shift에 의한 위상 변위가 발생되므로 Δx_i 만큼 진행함에 따라 위상차가 발생하며 이러한 위상차는 ray가 한번의 round trip을 함에 따라 2π 의 증배가 되어야만 도파 모드가 될 수 있다. 식(5)에서 φ_i 는 ray가 Δx_i 만큼 진행함에 따른 위상차를 나타내며 식(6)의 $-2\varphi_0$, $-2\varphi_t$ 는 도파로와 cover, 도파로와 기관사이의 경계면에서 발생하는 반사에 의한 위상차를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \varphi_i &= k_0 n(x_i) \sin \theta_i \cdot \Delta x_i \\ &= k_0 \sqrt{n^2(x_i) - N^2} \cdot \Delta x_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -2\varphi_0 &= -2 \cdot \arctan\left[\left(\frac{N^2 - n_c^2}{n_s^2 - N^2}\right)^{1/2}\right] \\ -2\varphi_t &= -\frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

도파로에 도파 모드가 형성되기 위해서는 ray가 한번의 round trip을 함에 따라 파장의 정수배 즉 2π 의 정수배가 되어야 하므로 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$\sum \varphi_i - 2\varphi_0 - 2\varphi_t = 2m\pi \quad (7)$$

식(6)과, (7)을 사용하면, 식(8)의 WKB 방정식을 얻을 수 있으며, 이것을 정리하여 식(9)과 같은

$$X(x) = A \exp[-(V_1^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}} \eta] ; \eta \geq 0$$

$$A \left[\cos(\mu_1 \eta) - \frac{(V_1^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}}}{\mu_1} \sin(\mu_1 \eta) \right]$$

$$; -1 \leq \eta \leq 0$$

$$A \left[\cos(\mu_1) + \frac{(V_1^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}}}{\mu_1} \sin(\mu_1) \right] \times \exp\left[(V_2^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}} (\eta + 1) \right]$$

$$; \eta \leq -1 \quad (15)$$

식(15)는 TE mode들의 field pattern이며, 식(16)은 전파상수를 결정하는 transcendental eq.이다.

$$\tan \mu_1$$

$$= \frac{(V_1^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}} / \mu_1 + (V_2^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}} / \mu_1}{1 - [(V_1^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}} / \mu_1] [(V_2^2 - \mu_1^2)^{\frac{1}{2}} / \mu_1]}$$

$$(16)$$

y축에 대해서도 비슷한 방법으로 전파상수를 결정하는 식(17a)과 (17b)을 얻을 수 있으며, 식(18a), (18b)에서 field pattern을 얻을 수 있다.

Symmetric mode의 경우

$$\mu_2 \tan \mu_2 = (V_3^2 - \mu_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (17a)$$

$$Y(y) = F \cos[\mu_2 \xi] ; |\xi| \leq 1 \quad (17b)$$

$$G \exp[-(V_3^2 - \mu_2^2)^{\frac{1}{2}} |\xi|] ; |\xi| \geq 1$$

$$\xi = \frac{2y}{b}, V_3 = k_0 \left(\frac{b}{2}\right) (n_f^2 - n_s^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$\mu_2 = \frac{b}{2} (k_0^2 n_f^2 / 2 - \beta_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

Antisymmetric mode의 경우

$$\mu_2 \cot \mu_2 = -(V_3^2 - \mu_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (18a)$$

$$Y(y) = H \sin[\mu_2 \xi] ; |\xi| \leq 1 \quad (18b)$$

$$\frac{\xi}{|\xi|} \exp[-(V_3^2 - \mu_2^2)^{\frac{1}{2}} |\xi|] ; |\xi| \geq 1$$

채널도파로 개개의 2차원적 전파상수를 통해 3차원 채널도파로의 전파상수 결정이 가능하므로, 도파로 제작에 있어서 적정 제작 조건을 결정할 수 있는 분산 관계식을 유도할 수 있다. 식(19)는 $\beta^2 = \beta_1^2 + \beta_2^2$ 관계에 의한 채널도파로의 분산 관계식을 나타낸 것이다.

$$\beta^2 = \frac{\beta^2 - k_0^2 n_s^2}{k_0^2 (n_f^2 - n_s^2)} = 1 - \frac{\mu_1^2}{V_2^2} - \frac{\mu_2^2}{V_3^2} \quad (19)$$

제 3 장 결과 및 고찰

본 연구는 광수동소자 설계의 기반 기술로서 Ag^+ , K^+ 이온과 Na^+ 이온교환에 따른 채널 도파로의 이론적인 해석과 Prism-Coupling 방법에 의한 도파 특성 측정을 예상한 도파로의 모델링을 통해 그 결과를 고찰하는데 목적이 있다.

3-1. 채널 도파로의 전파상수와 분산곡선

우선 x-축과 y-축에서의 각 mode에 대한 field pattern을 구하고 이에 따른 전파상수 β_1, β_2 를 구하기 위하여 silver 이온 교환의 경우 y-축에 대한 대칭모드는 식(17a)에 의해, 비대칭 모드는 식(18a)로부터 각각 μ_1 과 μ_2 의 β_1 과 β_2 를 변화시키는 transcendental equation을 이용하여 계산한다. 그림 3.4에 계산된 결과를 나타내었다. 이때 폭은 $8\mu m$, 깊이는 $8.854\mu m$ 로 가정되었다.

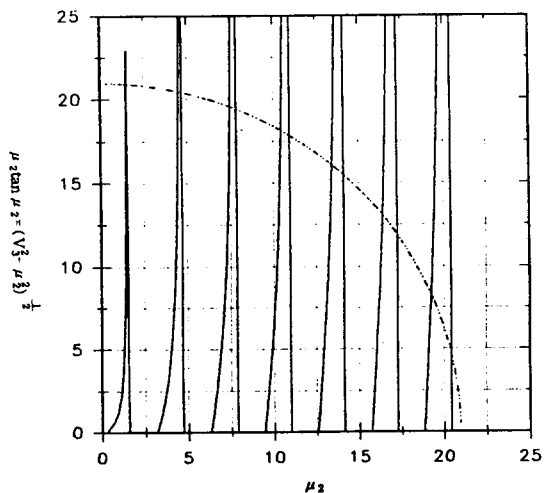


그림 3. 대칭인 경우 β_2 의 graphical solution
Fig. 3. Graphical solution of symmetrical β_2
(for silver ion-exchange, $w=8\mu m$, $d=8.854\mu m$)

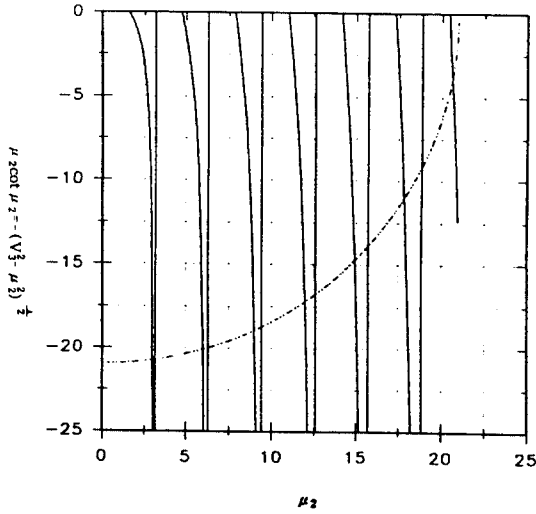


그림 4. 비대칭인 경우 β_2 의 graphical solution

Fig. 4. Graphical solution of antisymmetrical β_2 (for silver ion-exchange, $w=8\mu\text{m}$, $d=8.854\mu\text{m}$)

그림 3과 4에서 실선과 점선이 만나는 교차점으로부터 도파로의 폭 부분에 존재하는 대칭, 비대칭 모드들의 전파상수값(β_2)을 결정할 수 있으며 도파로의 길이인 x축에 존재하는 모드들의 전파상수값(β_1)은 그림 5에서 실선과 점선이 만나는 교차점으로 결정될 수 있다.

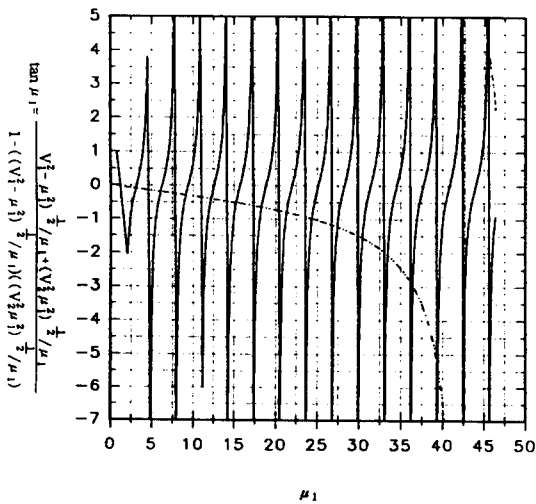


그림 5. β_1 의 graphical solution

Fig. 5. Graphical solution of β_1 (for silver ion-exchange, $w=8\mu\text{m}$, $d=8.854\mu\text{m}$)

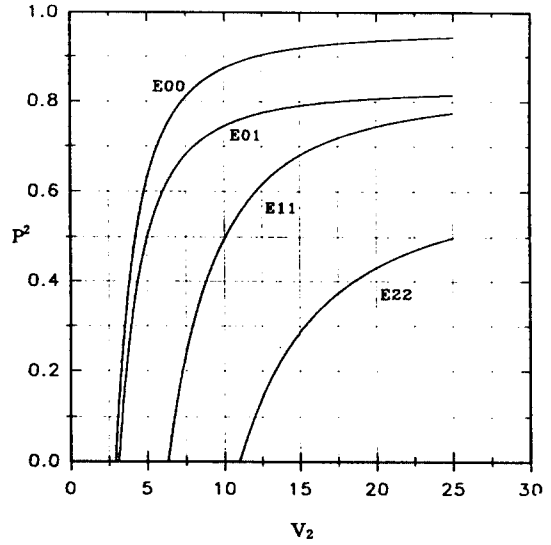


그림 6. Potassium 이온교환에 대한 분산곡선
Fig. 6. Dispersion curve for potassium ion-exchange ($w=8\mu\text{m}$, $d=8.189\mu\text{m}$)

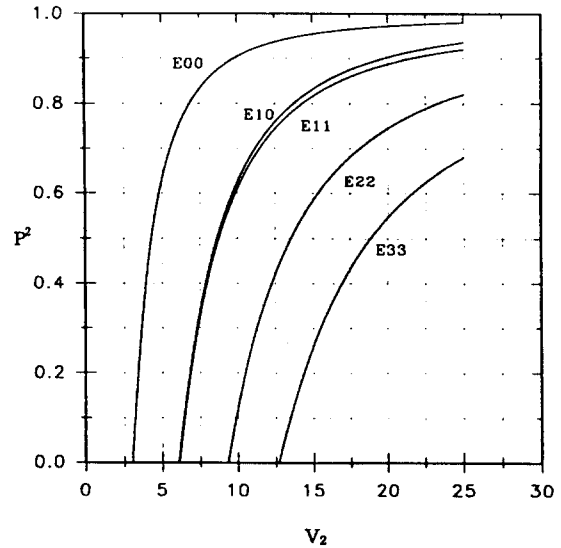


그림 7. Silver 이온교환에 대한 분산곡선
Fig. 7. Dispersion curve for silver ion-exchange ($w=8\mu\text{m}$, $d=8.854\mu\text{m}$)

그림 3,4 와 5에서 구한 β_1, β_2 를 β 의 관계식에 대입하여 채널 도파로의 전파상수를 예측하고 식 (19)의 분산 관계식에 대입하면 교환되는 이온에 따른 분산 특성곡선을 얻을 수 있다. 그림6과 7은 potassium ion과 silver ion의 분산 특성 곡선을 나타내고 있다. 이러한 분산 특성 곡선을 이용하면

우리가 제작하고자 하는 채널 도파로의 폭과 깊이의 결정을 가능케 한다. 즉, 이온교환도파로의 표면 굴절율과 기판의 굴절율을 알고 있으면 폭과 깊이를 조절하여 원하는 mode가 발생하는 채널도파로를 구성할 수 있다.

3-2. 채널 도파로내의 field 분포

채널 도파로의 도파 특성 모델링을 위해 입사광원을 632.8nm 파장의 He-Ne 레이저, 기판의 굴절율을 1.50, silver 이온교환 도파로와 potassium 이온 도파로의 굴절율은 Najafi¹²⁾ 등에 의해서 제시된 굴절율 변화량(Δn)을 참고로 하여 1.59와 1.509로 가정하였다.

그림 8은 potassium 이온 교환의 경우이고, 그림 9는 silver 이온 교환의 경우로 도파로의 깊이 방향에 따른 도파광의 단일 모드 이차원 field intensity 분포를 나타내고 있다. 또한 도파로의 굴절율 변화가 작을 경우 경계면에서의 evanescent field는 크게 됨을 알 수 있고, 이러한 evanescent field 관찰은 방향성 결합기와 prism-coupling에 의한 도파로의 여기 및 광집적회로의 구성에 있어서 고려되어야 할 중요한 요인이 된다.

표면 굴절율 변화(Δn)에 따른 cover와

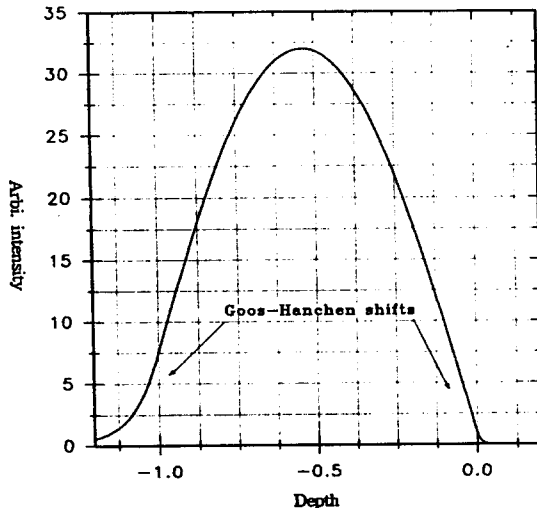


그림 8. Potassium 이온교환 도파로 깊이에 따른 이차원 field 분포

Fig. 8. 2-Dimensional field distribution of potassium ion-exchange waveguide with depth

substrate로의 evanescent field의 방사 깊이를 그림 10에 나타내었다. 여기서 이온교환 실효깊

이는 8.854 μm 이며, mode를 0과 5로 선택하였다. 이때 mode의 수가 증가하면 evanescent field의 방사 깊이가 증가함을 알 수 있다.

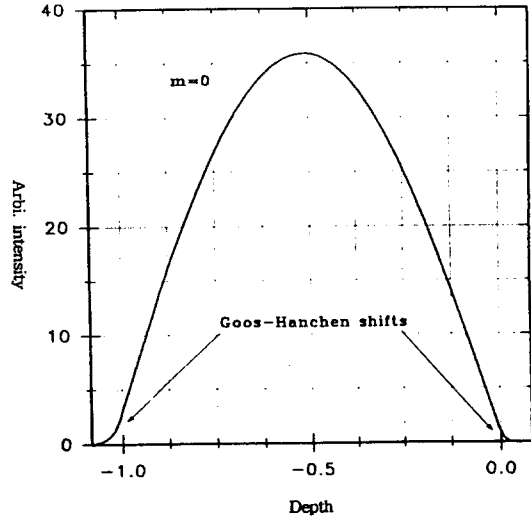


그림 9. Silver 이온교환 도파로 깊이에 따른 이차원 field 분포

Fig. 9. 2-Dimensional field distribution of silver ion-exchange waveguide with depth

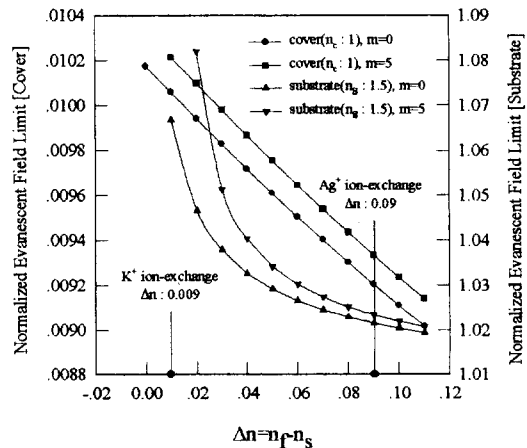


그림 10. 표면굴절율 변화에 따른 cover와 substrate로의 evanescent field 방사 깊이가 변화

Fig. 10. The Change of evanescent field into cover and substrate with surface index variation

그림 11과 그림 12는 현재 많은 연구가 진행되고 있는 silver 이온 교환에 의한 채널 도파로 내의 다중모드 삼차원 field intensity 분포를 나타내고 있다. 여기서 E^{xy} 에서 x와 y는 채널 도파로의 깊이와 폭 방향에 발생하는 모드의 수를 의미한다.

그림 11에서 E^{10} 은 레이저의 편광성분인 TE 파가 도파로 내부를 진행할 때 깊이방향으로 m=1인 두개의 전파모드가 발생하고, 폭방향으로 m=0인 단일 전파모드가 발생하여 광이 전파함을 의미한다.

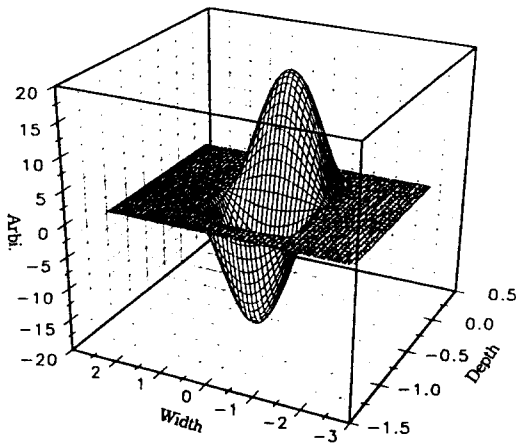


그림 11. Silver 이온교환 도파로의 삼차원 field 분포, E^{10}

Fig. 11. 3-Dimensional field distribution of silver ion-exchange waveguide

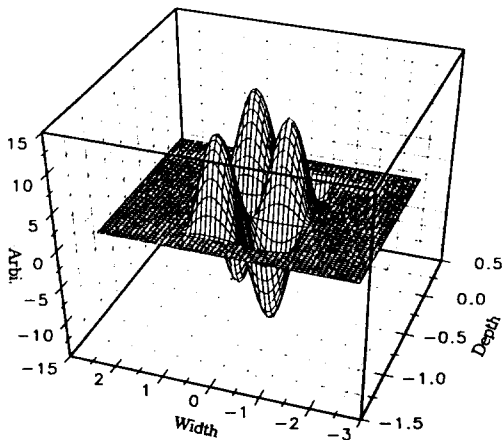


그림 12. Silver 이온교환 도파로의 삼차원 field 분포, E^{21}

Fig. 12. 3-Dimensional field distribution of silver ion-exchange waveguide

다. 마찬가지로 그림 12에서 E^{21} 은 TE 파가 폭방향으로 m=1인 두개의 전파모드가 발생하며, 깊이방향으로 m=2인 세개의 전파모드가 발생하여 광이 전파함을 의미한다.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 이온교환 채널 도파로의 제작 조건의 설정을 위해 제한적인 조건의 가정과 관련 수식의 유도 및 도파 특성의 해석으로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 가정한 조건에 따라 제작된 도파로는 단일모드와 다중모드가 발생할 수 있고 도파로의 굴절을 변화값이 작을수록 evanescent field가 증가함을 알 수 있었다. 일반적으로 이온교환에 의한 도파로의 굴절을 변화는 potassium($\Delta n=0.009$) 보다는 silver($\Delta n=0.09$)이온 교환시 더 크게 나타나는 것으로 되어 있으나, evanescent field에 의한 Goos-Hanchen shift 영역은 silver 이온교환의 경우에 m=0일 때 깊이에 대해 normalization시키면 공기중인 cover영역으로 약 9.2054×10^{-3} 이고 기판영역으로 약 1.0216정도이다. 그리고 potassium 이온교환의 경우에는 cover영역으로 약 0.01007이고 기판영역으로 약 1.07056정도이다. 이온교환에 의한 단일 모드의 채널 도파로를 제작하기 위해서는 도파로와 기판의 굴절율차를 줄여야 하며, 방향성 결합기와 분파기등의 제작을 위해서는 evanescent field를 고려하여 silver이온보다는 potassium이온을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다. 그러므로 낮은 도파손실과 단일모드의 채널 도파로 제작을 위해서는 순수한 silver이온 및 potassium이온 보다는 sodium이온과 potassium이 혼합된 이온 교환 방식의 채널 도파로 제작이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

※ 이 논문은 1994년도한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. T.Findakly and B.Chen, Appl. Phys, Lett. 40(7), pp.549, 1992
2. R.G. Walker and C.D.W Wilkinson, Appl. Optics, Vol.22, No.12, pp.1929, 1983
3. Richard A.Soref and Joseph P.Lorenzo, IEEE

- J. Quantum Electronics, Vol.QE-22, No.6, pp.873, 1986
4. Osamu Mitomi, Appl. Optics, Vol.31, No.12, pp.2030, 1992
 5. R.C. Alferness, R.V. Schmidt, and E.H. Turner, Appl. Physics, Vol.18, No.23, pp.4012, 1979
 6. G. Benjamin hocker and William K. Burnes, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.QE-11, No. 6
 7. W.J. Wang, S. Honkanen and S.I. Najafi, Appl. Phys. Let. 61(2), pp.150, 1992
 8. Jack R. Tessman, A.H. Kahn and Willaiam Shockley, Physical Review, Vol.92, No.4, pp.890, 1953
 9. Ramu V.Ramawamy, Ramakant Srivastava, P.Chuldzinski, and T.J.Anderson, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.24, No.5, pp.780, 1988
 10. Jens Johansson, Gnon Djanata, and Jean-Louis Coutaz, Appl. Optics, Vol.31, No.15, pp.2796, 1992
 11. Ramu V. Ramawamy an Iraj Najafi, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.QE-22, No.6, pp.883, 1986
 12. S. Iraj Najafi, "Introduction to Glass Integrated Optics." pp.96, Artech House, 1992

저자소개



박정일

1968년 12월 12일생. 1993년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사).



천석표

1971년 9월 3일생. 1994년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1995년 현재 동 대학원 전자재료공학과 석사과정.



박태성

1964년 6월 19일생. 1987년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1993년 11월-전자부품종합기술연구소 전임연구원. 1994년 광운대학교 전자재료공학과 대학원 박사과정. 1995년 현재 동 대학원



정홍배

1951년 1월 19일생. 1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983년 미국 M.I.T. 객원교수. 현재 광운대학교 공대 전자재료공학과 교수.

박사과정 수료.