特輯

광 도파 원리와 전송특성

金 昌 敏
서울市立大學校 電子工學科

Ⅰ. 서론

광통신이 활성적으로 연구되어지는 이유는 이가 광대역을 갖는 가장 경제적인 통신선로라고 하는 점이다. 광섬유는 거의 무한에 가까운 대역폭이 수용가능할뿐 아니라, 값싸고 무한정인 자원으로부터 얻어지며, 또한 가늘고 가볍고 쉽게 휘어져 취급이 용이하다. 요즈음 상용되는 광섬유는 사용대역폭이 6GHz 정도이며 밀리파통신의 도파로 전송대역폭보다 별반 나을것 없어보이나, 이는 다만 광반송자를 전기신호로 변조하는 고속 광전기술의 한계에 기인하는 것이다. 현재는 0.2dB/km의 극저손실 광섬유가 제작가능하며 100 ~ 200km의 장거리 무중계 광대역 전송이 가능하다.

한편 광통신이 이루어지기 위해서는 여러가지 기능을 갖는 수동소자, 능동소자들이 필요하다. 전자회로에서 수많은 기능소자들을 IC화 하듯이, 1970년 이후 광회로에서도 광IC화의 노력이 있어왔으며 "집적광학"이 학문의 한 분야로 자리잡게 되었다.[1,2] 한 개의 칩위에 놓여진 여러 광소자들을 잇는 광선로를 광도파로라 부른다. 광도파로는 광IC의 가장 기본적인 소자이며, 광도파원리는 모든 광소자 설계의 기초를 이룬다.

광도파로원리 및 전송특성을 전반적으로 이해하기 위해서 다음의 과정으로 서술하기로 한다. 첫째, 파동방정식을 기초로 파동의 기초개념, 즉 모드굴절율, 위상/군속도, 모드개념 및 대역폭을 결정하는 분산에 관하여 서술한다. 둘째, 현재 널리 쓰이고 있는 광섬유를 포함한 집적광학의 광도파로 해석을 다룬다.

Ⅱ. 광전송의 기초개념

1. 파동방정식

굴절율이 n(x ,y, z)인 매질에서 Helmholtz 파동방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2\vec{E}(x,y,z)+k_0^2n^2(x,y,z)\vec{E}(x,y,z)=0 \qquad (1)$$

단 $k_0=\dfrac{2\pi}{\lambda_0}=\dfrac{\omega}{c_0}$

전체 $\vec{E}(x,y,z)$가 다음과 같이 z축을 따라 규칙적인 위상분포를 보인다면

$$\vec{E}(x,y,z)=\vec{E}(x,y)e^{-j\beta z} \qquad (2)$$

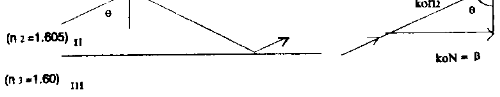
식(1)은 다음으로 변형된다.

$$\nabla^2\vec{E}(x,y)+(k_0^2n^2(x,y)-\beta^2)\vec{E}(x,y)=0 \qquad (3)$$

β는 전파상수이며 경계조건에 의하여 결정되는 상수이다.

2. 전반사, 모드 굴절율

계단형 굴절율 분포를 갖는 박막도파로를 그림1에 그렸다.



(a) (b)

그림 1. (a) 박막 도파로 (b) 진행파 벡터

Ⅰ영역은 공기, Ⅱ영역은 유리기판위의 박막도파로, Ⅲ영역은 유리기판이다.

두 경계면에서 전반사가 있기위한 임계각은 $\theta_{12} = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = 35.5$, $\theta_{23} = \sin^{-1}\left(\frac{n_3}{n_2}\right) = 85.5$ 이다.

i) θ 〈38.5°일때는 광은 진행후 얼마 못가 양경계면을 통하여 방사된다.

ii) 38.5°〈θ 〈85.5°일때는 광은 윗면에서는 전반사를 일으키나, 아랫면을 통하여 방사된다.

iii)θ 〉85.5°일때 광은 양면에서 전반사를 경험하며 도파되어 나아간다.

i), ii)를 방사모드, iii)은 도파모드라 부른다.

이제 그림 1.(b)와 같이 θ의 각도로 진행하는 광을 생각해 보기로 한다. 만약 경계면이 없다면 광은 k_0n_2 vector의 방향으로 평면파의 형태로서 굴절율 n_2인 코어 공간을 직진할 것이다. 그러나 경계면에서 전반사로 말미암아 θ의 각도로 입/반사하며 z축을 따라 진행한다. 이경우 z축의 입장에서 보면 광은 k_0N vector을 따라 나아가는 것에 불과하다. 즉

$$\beta = k_0N = k_0n_2\sin\theta,\ \ N = n_2\sin\theta \qquad (4)$$

의 관계가 성립한다. 이때 N을 도파로의 실효굴절율(effective index), 또는 모드굴절율이라 부른다. 이상을 종합하면 광이 도파되기 위한 N의 조건은

$$n_3 < N < n_2 \qquad (5)$$

가 되어야 한다.

3. 파동의 분류

전자파의 도파형태는 보통 네종류로 분류되며 (1)공간의 평면파, (2)두도체 선로간의 전자 파, (3)중공도파관내 전자파, (4)유전체 도파로의 표면파 등이다.

(1) 공간의 평면파

모든 전자파는 구면파의 형태로 방사되나 먼거리를 진행한 후에는 평면파의 형태로 근사화 된다. 평면파는 전파방향 z축을 따라 평면의 형태로 (x- y 횡면상에서의 전자계의 변화가 없으므로 $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$) 나아가며, z축으로는 $e^{j(\omega t-\beta z)}$ 의 위상 변화를 갖는다. 균일 매질(굴절율 n)속을 직진하는 파가 이에 속하며, $\beta = k_0n$으로써 식(3)을 만족시킨다.

(2) 두도체 선로간에 도파되는 전자파

전계, 자계 벡터가 횡면에만 존재하는 즉 $E_z = H_z = 0$인 경우로써 TEM파라 부른다. 평면 파도 일종의 TEM 파이다. $\beta = k_0n$이며, 평행 전송선로, 동축케이블 등이 이에 속한다.

(3) 중공 도파로 속에 도파되는 전자파

금속벽의 경계조건으로 말미암아, TEM파처럼 z축을 따라 직진을 할 수 없다. zig - zag 모습으로 진행하므로 실제 도파로를 따라 흐르는 에너지의 전파속도(군속도)는 균일 매질속의 평면파보다 느리다. TE파($E_z = 0$, $H_z \neq 0$)와 TM파($H_z = 0$, $E_z \neq 0$)로 나뉜다. $\beta \neq k_0n$이다.

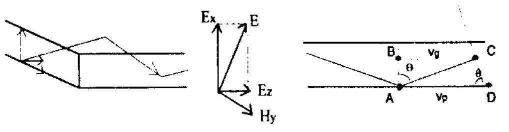
(4) 표면파

유전체 도파로 내에서 빛의 전반사 현상을 이용하여 광을 도파시키는 경우이다. 광전기판위의 광도파로나 혹은 광섬유속을 전파하는 빛이 이에 속한다. $\beta \neq k_0n$이다.

이상의 도파로에서 (1)의 평면파는 공간속을 나아가는 모든 전자파 및 광파에 해당되며 (2), (3)은 주로 전기, 전자파의 영역에서 나타나고, (4)는 대체로 광파에 해당된다.

4. 위상속도, 군속도

박막 도파로 속을 진행하는 파를 예를 들어 설명하기로 한다.



(a) (b) (c)

그림 2. (a)중공 도파로내 파의 진행방향
(b)전자계 벡터
(c)옆에서 본 파의 반사진행

그림 2에는 TM모드가 진행하고 있다. $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$를 적용시키면 전자파의 진행은 θ의 각도로 반사하며 나아가는 것을 알 수 있다. 그림 2.(c)에서 파속은 θ의 각도로 $\upsilon = \frac{\omega}{k_0n_2}\left(\dot{AC}\right)$로 나아가며, 에너지의 흐르는 속도(군속도, group velocity)는 $\upsilon_g = \frac{\omega}{\beta}\left(\dot{BC}\right)$임을 알 수 있다. 점선은 파면을 나타내며 파면의 그림자속도

(위상속도, phase velocity)는 z축을 따라 v_p의 속도 $(\overline{AD})$로 나아간다. 직각 삼각형의 원리에 따라

$$v^2 = v_p v_g, \quad v_g \le v \le v_p \tag{6}$$

가 됨을 알 수 있다. v_g는 z축을 따라 실제 광에너지가 진행하는 속도이고, v_p는 파면(동위상면)이 z축에 투사된 그림자의 속도라고 생각하면 이해하기 쉽다. 만약 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 가 되어 파가 평행하게 나아갈 때는 평면파가 되며 $v_p = v = v_g$가 된다. 또한 $\beta = k_0 n$이 된다. 이런 경우는 TEM모드에서만 가능하다.

5. 모드개념

모드란 전자파 혹은 광파가 도파로내와 주위를 어떠한 형태를 취하며 전파하여 나아가는가이다. 모드의 분류는 파가 도파로의 종축(z축)을 따라 나아갈 때 전계, 자계의 z축 성분이 있는가 없는가에 따라 TEM, TE, TM 등으로 분류된다. 한편, 같은 TE/TM모드 내에서도 오직 한 경로만을 취하며 파가 나아가느냐, 또는 여러 경로가 가능한가에 따라 단일모드, 다모드로 분류된다.

(1) TEM모드

TEM(Transverse Electric & Magnetic Field) 모드는 파가 z축(종축)을 따라 전파할 때 전계 $\vec{E}$와 자계 $\vec{H}$ 는 오직 Transverse면(횡면)에만 존재하는 파이다. 즉, $E_z = H_z = 0$인 경우이며, 주로 전송선로나 동축케이블과 같이 분리된 두 도체를 따라 전파하는 경우가 이에 속한다.

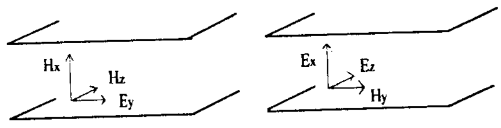
$$\vec{E} = -\nabla\phi(x,y)e^{j(\omega t-\beta z)} \tag{7}$$

두 도체의 구조와 주어진 전위에 따라 $\nabla^2\phi(x,y) = 0$를 구하면 $\vec{E} = -\nabla\phi$ 로 부터 $\vec{E}$ 가 결정된다. 전파정수 $\beta = k$로써 매질 내 평면파와 속도가 동일하다.

(2) TE / TM 모드

TE(Transverse Electric Field)모드는 파가 z축을 따라 진행할 때 전계 E는 오직 횡면(x-y 평면)에만 존재하는 즉, $E_z = 0$인 파이다. TM모드는 $H_z = 0$인 경우에 해당된다. 박막 광도파로의 예를 들면 다음과 같다.

Poynting 벡터 $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$ 를 고려하면, 두 모드의 파는 모두 상하로 반사운동을 하며 z축을 따라 나가는 것을 알수 있다.



(a)TE모드 (b)TM모드

그림 3. 모드 분류

(3) Hybrid (혼성) 모드

그림 3의 박막이 서로다른 유전율의 적층구조를 이룰 경우나, 원형 광섬유의 경우는 순수한 TE, TM모드 외에도 $E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$인 혼성의 해가 존재한다. 이를 혼성모드라 부른다.

이상의 모드분류는 전자계의 z축 성분 유무로서 분류한 경우이다. 그러나 같은 TE/TM모드인 경우에서도 여러개의 θ 가 해로서 가능한 경우가 있다. 이 경우를 다모드 도파로(광섬유)라 부른다. 코어부분의 굴절율 조정, 또는 박막두께의 조정에 의하여 오직 한개의 θ 가 존재하도록 설계하면 오직 한개의 진행방식(모드)이 허용된다. 이 경우를 단일모드 도파로(광섬유)라 부른다.

6. 분산(Dispersion)

분산의 본래 정의는 「빛의 파장에 대한 성질의 변화」이다. 그러나 널리 쓰이는 분산의 의미는 광섬유에 입사된 광펄스가 적당한 거리를 진행한 후 펄스의 확산이 발생하는 현상을 말한다. 광통신에서는 대부분의 경우 펄스 변조에 의하여 정보전송이 이루어진다. 이때 정보전송량을 제한하는 요인으로는 광섬유 수신단에서 펄스의 확산이 가장 중요하다. 분산에는 세가지 요소 (1)다모드 분산, (2)도파로(구조) 분산, (3)재료분산이 있다.

(1) 다모드 분산 : 송신단의 한펄스가 여러 모드로 분해된후, 서로 다른 각도를 통하여 전 파되기 때문에 군속도(z축을 따라 흐르는 속도)가 다르고 각각 다른 시간에 수신단에 모이므로 펄스의 흐트러짐이 발생한다. 단일모드 광섬유에는 해당되지 않는다.

(2) 도파로(구조) 분산 : 도파로 해석을 하면 단일모드 영역내에서도 주파수(파장)에 따라 군속도가 다르게 계산된다. 펄스는 여러 주파수의 중첩으로 나타나므로 펄스의 확산이 일어나며, 이로 인한 분산을 도파로분산이라 한다. 이 분

산은 도파로 구조 설계 에 따라 조정이 가능하다. 구조분산이라고도 부른다.

(3) 재료분산 : 빛의 주파수(또는 파장)에 따라 도파로 재료의 굴절율이 변화하여, 그로 인하여 발생하는 분산을 말한다.

여기서는 단일모드 광섬유를 대상으로 도파로 분산과 재료분산만 생각해 보기로 한다. 파수 k에서 군굴절율은 $\frac{d\beta}{dk}$ 이며, 단위길이당 군지연 $\Delta\tau$ 는 다음과 같다.[3]

$$\frac{d\beta}{dk} \approx \left(n_2 + k\frac{dn_2}{dk}\right) + (n_1 - n_2)\frac{d(vb)}{dv} \quad (8)$$

$$\Delta\tau \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda c}\left[k\frac{dn_2}{dk} + (n_1 - n_2)\frac{d^2(vb)}{dv^2}\right] \quad (9)$$

n_1, n_2는 각각 광섬유 코어 굴절율, 클래드 굴절율이다. 식(8), (9)의 v, b는 각각 정규화 주파수, 정규화 전파상수로써 식(14)에 정의되었다.

식(8), (9)의 우변의 첫째항은 재료분산에 관계되고, 두째항은 도파로 분산에 관계된다. 그림 4에는 단일모드광섬유의 파장에 따른 분산특성곡선이 있다.

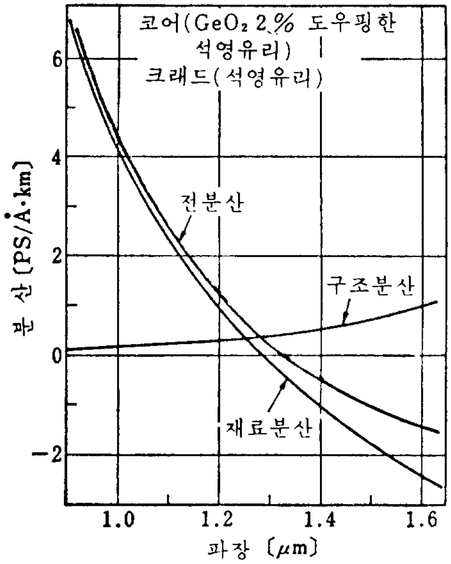


그림 4. 단일모드 광섬유의 분산특성

도표상으로는 λ = 1.325μm에서 전분산치가 0이 된다. 따라서 광섬유를 이 파장대에서 사용하면 광대역의 전송로가 된다. 그러나 광섬유 전송손실의 입장에서 보면 λ = 1.3μm에서 0.6 dB/km이고, λ = 1.55μm에서 0.2 dB/km가 이루어지고 있다. λ = 1.55μm를 채택하면 무중계 전송거리가 3배에 이른다는 사실을 감안하면, 이 파장대에서 전분산치를 0으로 할수 있는 도파로 구조설계를 가능케 함으로써 저손실 광대역 장거리 전송로를 실현시킬수가 있다.

Ⅲ. 도파로 해석

1. 계단형 박막 도파로

박막 도파로는 평면형 도파로이므로 채널도파로에 비하여 실용적이지 못하고 특수한 경우를 제외하고는 쓰이지 않는다. 그러나 도파개념을 이해하는데는 가장 간결하고 좋은 예이다. 그림 5는 y축으로 무한한 박막도파로이다.

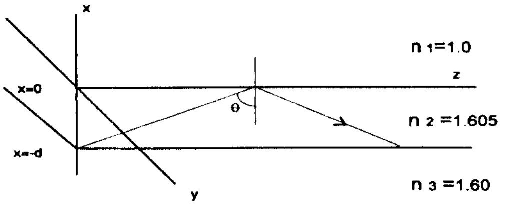


그림 5. y축으로 무한한 박막 도파로($\frac{\partial}{\partial y} = 0$)

Maxwell 방정식을 풀어쓰면 TE모드, TM모드는 각각 다음과 같다.

TE모드	TM모드
$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\vec{E}_y + (k_0^2 n^2 - \beta^2)\vec{E}_y = 0$	$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\vec{H}_y + (k_0^2 n^2 - \beta^2)\vec{H}_y = 0$
$H_x = \frac{-\beta}{\omega\mu_0}E_y$	$E_x = \frac{\beta}{\omega\varepsilon_0 n^2}H_y$
$H_z = \frac{-1}{j\omega\mu}\frac{\partial E_y}{\partial x}$	$E_z = \frac{1}{j\omega\varepsilon_0 n^2}\frac{\partial H_y}{\partial x}$
(10)	(11)

여기서는 TE모드만을 해석해 보기로 한다.

$$E_y(x) = \begin{cases} Ae^{-px} & x > 0 \\ A[\cos qx - \frac{p}{q}\sin qx] & -d < x < 0 \\ A[\cos qd + \frac{p}{q}\sin qd]e^{r(x+d)} & x < -d \end{cases} \quad (12)$$

로 놓은 후 E_y와 H_z의 두경계면에서 연속성을 고려하면

$$k_0 d\sqrt{n_2^2 - N^2} = (m-1)\pi - \tan^{-1}\sqrt{\frac{N^2 - n_1^2}{n_2^2 - N2}} - \tan^{-1}\sqrt{\frac{N^2 - n_3^2}{n_2^2 - N^2}} \quad (13)$$

단　$\beta = k_0 N$,　　$m = 1,2,3,...$(모드 번호)

의 고유 방정식을 얻는다. 그림 5의 굴절율분포 및 구조에 대하여 고유방정식을 통하여 몇개의 예를 들기로 한다.

[예 1] λ = 1.3μm, d = 5μm
　　m=1, N= 1.6023, b = 0.4619, θ =86.7°

[예 2] λ = 1.3μm, d = 10μm
　　m=1, N= 1.6041, b = 0.8125, θ =88.0°
　　m=2, N= 1.6014, b = 0.2815, θ =86.2°

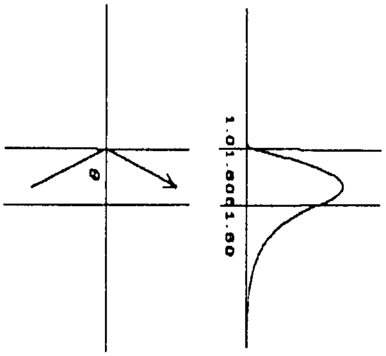


그림 6. 단일모드 도파 (d = 5μm) (a)전파각 86.7° (기본모드 m = 1) (b)$E_y(x)$분포

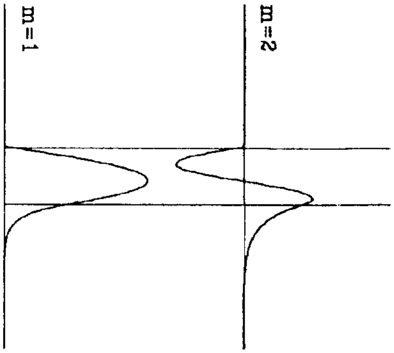


그림 7. 다모드 도파 (d = 10μm)E_y(x)분포
(a)전파각 : 88.0° (기본모드 m = 1)
(b)전파각 : 86.2° (2차모드 m = 2)

[예 1] 에서는 m= 1인 경우에만 해가 나오고, [예 2] 에서는 m= 1, 2 두경우에 대해서만 해가 나온다. 이상 구해진 해들의 반사각 θ는 모두 전반사 조건인 85.5°이상임을 유의하라.

그림 6, 그림 7은 이상의 해를 E_y의 분포와 이에 대응되는 전파 각도를 그린 것이다.

그림7 (b)에서는광도파로의 한점에 광이 입사된후 입사조건에 따라 두개의 경로로 광에너지가 나뉘어 진다.

이들은 경로의 차이로 말미암아 수광단에 도착 시간이 다르게 되므로 분산효과가 나타난다. 이를 다모드 분산이라 부르며 단거리 통신용을 제외하고는 광통신용으로는 쓰이지 않는다.

단일모드 광도파로를 설계함에 있어서 n_1, n_2, n_3, λ, d가 주어질 때마다 식(13)의 고유방정식을 푼다는 것은 대단히 번거로운 일이다. 세개의 새로운 변수를 도입함으로서 이러한 문제를 해결할 수 있다. 정규화 주파수υ, 정규화 전파상수 b, 비대칭율 a 를 다음과 같이 정의한다.

$$v = k_0 d\sqrt{n_2^2 - n_1^2},\quad b = \frac{\left(N^2 - n_3^2\right)}{\left(n_2^2 - n_3^2\right)}$$

$$a = \frac{\left(n_3^2 - n_1^2\right)}{\left(n_2^2 - n_3^2\right)},\quad 단\quad n_2 > n_3 > n_1 \quad (14)$$

대칭인 도파로에서는 n_1=n_3이므로 a = 0 이다. 그러나 박막형태의 광도파로에서는 그림 5의 에 (a = 97.3) 같이 a가 거의 ∞인 경우가 대부분이다. 식(14)의 치환 변수를 사용하여 고유방정식 식(13)을 변환시키면 다음과 같다.

$$v\sqrt{1-b} = (m-1)\pi - \tan^{-1}\sqrt{\frac{1-b}{b+a}} - \tan^{-1}\sqrt{\frac{1-b}{b}} \quad (15)$$

비대칭율 a = 100 에 대하여 식(15)의 해들을 그래프로 나타내면 그림 8과 같다.

앞의 [예1] 과 [예2] 는 a = 100에 대하여, 각각 υ =3.06과 υ = 6.12에 해당된다. a = 100인 도파로의 경우 m = 1, 2 일때 차단 정규화 주파수 $\upsilon_{cut\ off}$는 각각 1.57, 4.71이다.

따라서 단일모드 도파로가 설계되기 위한 υ의 범위는 1.57 〈 υ 〈 4.71이다. b가 클수록 광이 코어부분에 집중되는 현상이 강하므로 υ = 4.7 정도가 되도록 설계함이 바람직하다.

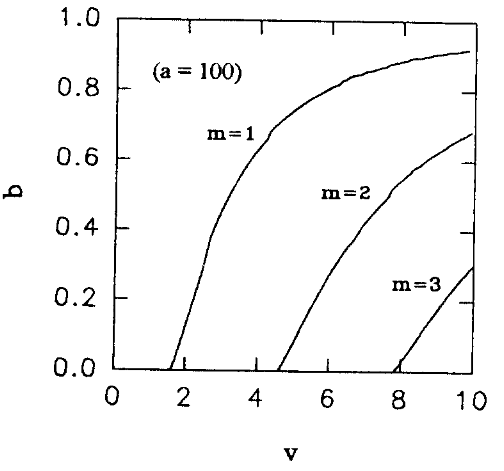


그림 8. 계단형 굴절율 분포 박막도파로의 b-v 곡선

2. 언덕형 박막 도파로

언덕형 박막 도파로의 대표적인 경우는 Ti:$LiNbO_3$ 평면형 도파로이다. Ti:$LiNbO_3$ 도파로를 대상으로 해석하기로 한다. n_1, n_2의 경계는 뚜렷하나 n_2, n_3의 경계가 따로 없는 언덕형태의 분포를 이루고 있으며, 이는 Ti의 $LiNbO_3$ 기판내로의 내부확산에 기인한다. 파동 방정식은 TE모드의 경우 식(10)과 동일하다. $E_y(x)$의 해석에 있어서는 다음의 방법들이 유력하다.

(1) 횡면 공진(Transverse Resonance)

식(13) 을 변형시키면 다음식을 얻는다. [3]

$$2m\pi = 2k_0\int_t^0 \sqrt{n_2(x) - N^2}\,dx + 2\tan^{-1}\sqrt{\frac{N^2 - n_1^2}{n_2^2(t) - N^2}} + 2\tan^{-1}\sqrt{\frac{N^2 - n_2^2(t^+)}{n_2^2(t^-) - N^2}} \qquad (16)$$

단, t는 $n_2(t)=N$이 성립되는 깊이 위치

우변 첫째항은 횡면 왕복위상변화이고, 두째항은 n_1에서 반사 할때 위상변화이나 분모가 0이므로 π 가 된다. 세째항은 언덕형 분포중 x=t에서 반사할때의 위상변화이며 $\lim_{t^+\to t}[N^2 - n_2^2(t^+)] = \lim_{t^-\to t}[n_2^2(t^-) - N^2]$ 이므로 $\frac{\pi}{2}$이다.

식 (16)은, 우변의 총합은 2π 의 배수가 되어야 한다는 것을 의미하는 것이다. 따라서

$$m\pi = k_0\int_t^0 \sqrt{n_2(x) - N^2}\,dx + \pi + \frac{\pi}{2} \qquad (17)$$

의 식을 얻는다. 만약 n_1, n_2의 경계도 언덕형이라면 우변 두째항은 π 대신 $\frac{\pi}{2}$가 되어야 할것이다.

(2) WKB 방법

1930년대의 양자이론중 언덕형 전위우물을 갖는 schrödinger방정식을 수학적으로 해석하고자 Wentzel, Kramers, Brillouin에 의하여 제안된 방법이다. 그 해석과 결과식은 식(16), (17)과 동일하다. [3] 횡면 공진 해법에서는 전계분포를 알수 없는 반면, WKB 에서는 고유치와 전계분포를 동시에 알 수 있다는 잇점이 있다. 그러나 이상의 두 방법들은 고유 방정식이 수학표기 형태로 가능하다는 면은 있지만 Cut-off 근처에서의 오차가 매우 크므로 현재는 잘 쓰이지 않는다. 다만 b 〉 0.5 인 다모드 도파로에서는 모드수를 계산할때 쓰이고 있다. 계단형, 언덕형 박막 도파로를 막론하고 이들의 전계분포와 고유치를 거의 정확하게, 그리고 대단히 빠른 계산속도로 가능케 하는 방법들이 바로 수치해석들이며, 대표적인 예로는 FDM(Finite Difference Method:유한차분법) [4], FEM(Finite Element Method:유한요소법) [5] 등이 있다.

3. 계단형 채널 도파로

박막 도파로가 2-D 평면구조를 갖고 있는 반면, 채널도파로는 3-D구조를 갖고 있다. GaAs기판에 형성되는 채널도파로가 대표적인 계단형으로써, 채널도파로를 해석하는 방법으로는 Marcatili [6], 2-D FDM, 2-D FEM 등이 있지만 여기서는 가장 흔히 사용되는 EIM(Effective Index Method:실효굴절율)법을 소개하기로 한다. 그림 9 에서는 매립형 광도파로가 그려져 있다.

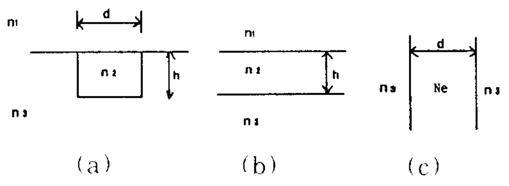


그림 9. (a) 매립형 광도파로 (x:수평, y:수직)
(b) 도파영역을 좌우로 확장한 그림 (N_e를 구한다.)
(c) N_e로써 (a)의 도파영역을 대치시킨 그림 (N을 구한다.)

이 형태의 도파로는 표면이 매끄럽게만 처리된다면

1 dB/cm이하의 전파손실이 가능하다. 표면이 평판형이므로 전극을 쉽게 증착 시킴으로써 광변조/스위칭 을 갖는 능동소자 제작이 가능하다. 그림 9에 최종 모드굴절율 N을 구하는 과정이 도식화 되어 있다. 그림 (b)의 N_e를 실효굴절율이라 부른다. N_e를 구하는 방법은 박막도파로의 해법과 동일하다. TE모드경우, 전계가 수평벡터이므로 (b)도의 TE모드 N_e를 구한후 (c)도의 TM모드해 N을 구한다. TM모드경우, 전계가 수직 벡터이므로 (b)도의 TM모드 N_e를 구한후 (c)도의 TE모드해 N을 구한다. 그림 10에서는 d = 2h인 구조를 대상으로 TE모드에 대하여, 실효굴절율법에 의한 해와 FEM 수치해석에 의한 거의 정확한 해를 비교하여 보았다.

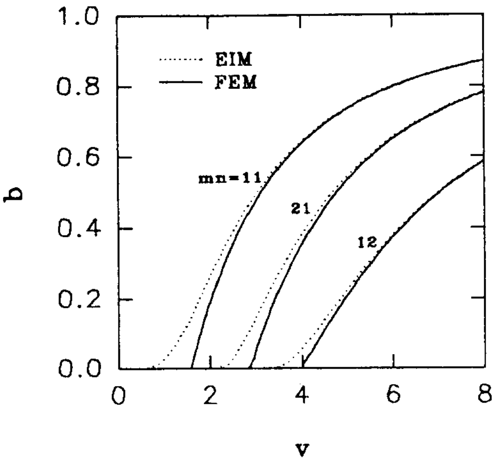


그림 10. 실효굴절율법 및 2-D FEM 결과 비교
d = 2h, (m: x축 모드, n: y축모드)

그림 10에서 b가 클수록 실효굴절율법은 좋은 결과를 얻는다. 그러나 b가 작은 영역, 특히 차단영역 (b = 0)에서의 오차는 무시하기 곤란할 정도로 큰것이 단점이다. 다만 어떤 수치해석보다도 방법이 간단하고 조그만 탁자계산기 만으로도 해를 얻을 수 있다는 장점으로 말미암아 많이 쓰여지고 있다.

4. 언덕형 채널 도파로

Ti:LiNbO$_3$가 대표적인 언덕형 채널 도파로로서 가장 널리 제작되고 있는 소자이다. 해석 방법으로는 2-D FDM, 2-D FEM 등이 있지만 역시 확장된 개념의 EIM이 가능하다. 그림 11에 Ti 내부 확산으로 말미암은 채널도파로의 굴절율 분포와 이를 EIM을 통하여 해석하는 과정을 도식화 하였다. EIM으로 말미암은 오차는 그림 9와 유사하므로 생략한다.

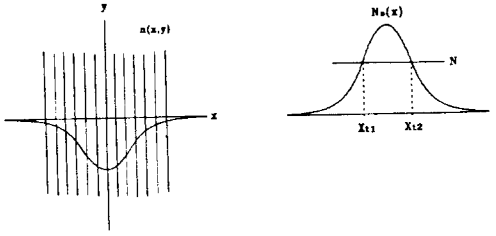
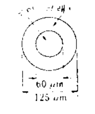
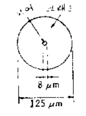
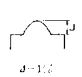
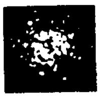


그림 11. Ti:LiNbO$_3$ 언덕형 채널 도파로
(a) 도파로를 수직의 가는 띠들로 분해, $N_e(x)$를 구함
(b) $N_e(x)$로 부터 N을 구함

Ⅳ. 광섬유

광섬유는 광통신의 전송로로써 1970년 Corning회사가 석영유리를 이용 20 dB/km 의 손실을 얻은 이래, 꾸준한 발전을 거듭하여 현재는 λ =1.55μm에서 0.2 dB/km의 극저손실치가 실현되고 있어 100 ~ 200km의 장거리 무중계 광전송이 가능하게 되었다. 표 1에는 광섬유의 종류와 특징을 보여주고 있다. 광

표 1. 광섬유의 종류와 구조 및 특징

항　목	언덕형 다모드 광섬유	계단형 단일모드 광섬유
형　상		
굴절율분포		
near field pattern		
특　징	결합효율이 큼 광대역	저손실 초광대역

통신의 광파장은 보통 λ = 1.3μm 또는 1.55μm가 쓰인다. 단일모드 광섬유는 HE_{11}하나의 모드만을 전송하기 때문에 실제 광통신에서는 HE_{11}모드가 쓰인다.

1. 광섬유 해석

광섬유 중심축을 z축으로 놓고 원통좌표계(r, φ, z)를 설정한다. 계단형 굴절율 분포를 갖는 광섬유의 해석은 대부분의 다른 도파로 해석과 같이 E_z 또는 H_z를 중심으로 출발한다. 그러나 언덕형 굴절율 분포를 갖는경우, 특히 EH/HE 모드의 경우에는 횡면전계를 중심으로 해석이 나누어진다. 여기서는 지면상 계단형 굴절율 분포 광섬유의 해석만 다루기로 한다.

광섬유내의 전자계를 진행방향 성분(z성분)과 횡면성분(Transverse 성분)으로 구분하여

$$\vec{E} = \left[\vec{E}_t(r,\phi) + \hat{z}E_z(r,\phi)\right]e^{j(\omega t-\beta z)} \tag{18 a}$$

$$\vec{H} = \left[\vec{H}_t(r,\phi) + \hat{z}H_z(r,\phi)\right]e^{j(\omega t-\beta z)} \tag{18 b}$$

로 놓는다. 이식을 Maxwell 방정식에 대입하여 정리하면

$$\vec{E}_t = \Omega\left[\nabla_t E_z - \frac{\omega\mu}{\beta}\hat{z}\times\nabla_t H_z\right] \tag{19 a}$$

$$\vec{H}_t = \Omega\left[\nabla_t H_z + \frac{\omega\mu}{\beta}\hat{z}\times\nabla_t E_z\right] \tag{19 b}$$

여기서, $\Omega = \dfrac{-j\beta}{\omega^2\mu\varepsilon - \beta^2}$

식(19)를 (E_r, E_ϕ), (H_r, H_ϕ)에 관한 함수로 풀어쓰면 다음과 같다.

$$E_r = \Omega\left(\frac{\partial E_z}{\partial r} + j\frac{\omega\mu\gamma}{\beta r}H_z\right) \tag{20 a}$$

$$E_\phi = \Omega\left(j\frac{\nu}{r}E_z - \frac{\omega\mu}{\beta}\frac{\partial H_z}{\partial r}\right) \tag{20 b}$$

$$H_r = \Omega\left(\frac{\partial H_z}{\partial r} - j\frac{\omega\varepsilon\nu}{\beta r}E_z\right) \tag{20 c}$$

$$H_\phi = \Omega\left(j\frac{\nu}{r}H_z + \frac{\omega\varepsilon}{\beta}\frac{\partial E_z}{\partial r}\right) \tag{20 d}$$

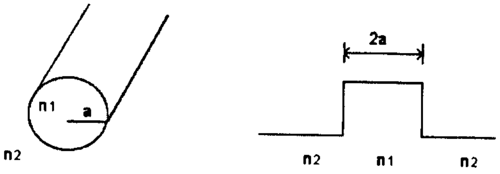
그리고 전계, 자계의 z성분은 다음의 식을 만족시킨다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}E_z(r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}E_z(r) + (\omega^2\mu\varepsilon - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2})E_z(r) = 0 \tag{21}$$

단 $E_z(r,\phi) = E_z(r)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t-\beta z)}$ (22)

의 식을 얻는다. ν 는 φ 방향으로의 모드수이다. H_z에 대해서도 식(21), (22)가 적용된다.

실제 사용되는 단일모드 광섬유는 제작조건, 분산효과등을 고려하여 약도파 (weaklyguiding) 조건하에 설계되며, 계단형 굴절율 분포를 갖는 광섬유는 그림 12와 같다.



(a)광섬유 (b)굴절율 분포

그림 12. 계단형 굴절율 분포를 갖는 광섬유
약도파(weakly guiding)조건 ($\frac{n_1-n_2}{n_1} < 0.5\%$)

먼저 n_1, n_2, k, β, a 등을 새로운 변수 u, υ, w로 치환 시킨후

$$u^2 = a^2\left(k_0^2 n_1^2 - \beta^2\right)$$
$$w^2 = a^2\left(\beta^2 - k_0^2 n_2^2\right)$$
$$\upsilon^2 = u^2 + w^2 = a^2 k_0^2\left(n_1^2 - n_2^2\right) \tag{23}$$

식(21)을 인용하면 전, 자계의 z축 성분에 대하여 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial R}{\partial r} + \left(\frac{u^2}{a^2} - \frac{\nu^2}{r^2}\right)R = 0,\ r \le a \tag{24 a}$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial R}{\partial r} + \left(\frac{\omega^2}{a^2} + \frac{\nu^2}{r^2}\right)R = 0,\ r \ge a \tag{24 b}$$

R(r)은 E_z(r), H_z(r)를 의미한다. 식(24 a), (24 b)의 해는 각각 잘 알려진 Vessel함수 $J_\nu\left(\frac{ur}{a}\right)$, $K_\nu\left(\frac{\omega r}{a}\right)$이다. r = a에서 경계조건을 적용시키면 각 모드의 고유방정식을 얻는다.

2. 모드분류(TE, TM, HE, EH)

(1) TE_{0m} 모드(E_z=0, ν =0)

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} + \frac{K_1(w)}{wK_0(w)} = 0 \tag{25}$$

차단 주파수를 υ_c라 하면 차단조건은 다음과 같다.

$$J_0(\upsilon_c)=0 \qquad (26)$$

(2) $TM_{0\mu}$ 모드 (H_z=0, ν=0)

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)}+\frac{n_2^2}{n_1^2}\frac{K_1(w)}{wK_0(w)}=0 \qquad (27)$$

단일모드 광섬유는 대부분 그림 12의 조건처럼 약도파조건을 만족시키므로 TM모드의 고유방정식(27)은 TE모드의 고유방정식 식(25)와 거의 동일한 것으로 간주할수 있으며,따라서 차단 주파수 조건도 동일하다. 식(25)의 μ 번째 해를 고유치로 하는 경우 $TE_{0\mu}$, $TM_{0\mu}$ 모드라 부른다.

TE모드와 TM모드 공히 ν = 0 이어야 하는 이유는 식(20)으로부터 찾아볼 수 있다. TE모드 경우 E_z= 0 이므로, E_r, E_ϕ, H_r, H_ϕ는 모두 H_z의 함수가 된다. 그러나 이중의 E_r 성분은 ν = 0가 아니면 $\epsilon_1 E_1=\epsilon_2 E_2$의 경계조건에 위배됨을 쉽게 알수 있다. 이러한 이유로 TE모드는 ν = 0 이어야만 하고, 역시 동일한 이유로 TM모드도 ν = 0 이어야만 한다. TE_{01}, TM_{01} 모드의 전자계 분포는 그림 13과 같다.

TE, TM 모드는 ν = 0이므로 ϕ의 방향으로 변화가 없으므로 광섬유의 반경면을 따라 상하 반사운동을 하며 나아가는 자오광선의 형태를 취한다.

(3) $HE_{\nu\mu}$ 모드 (E_z≠0, H_z≠0, ν ≥1)

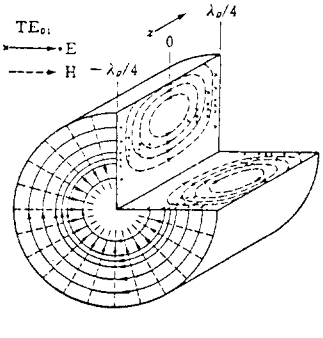
$$\frac{J_{\nu-1}(u)}{uJ_\nu(u)}-\frac{k_{\nu-1}(w)}{wk_\nu(w)}=0, \qquad (28)$$

차단주파수조건은 다음과 같다.

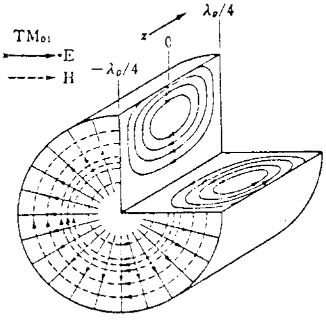
$$J_1(\upsilon_c)=0, \quad HE_{1\mu}(\nu=1) \qquad (29)$$

$$J_{\nu-2}(\upsilon_c)=0, \quad HE_{\nu\mu}(\nu\geq 2,\ \upsilon_c>0) \qquad (30)$$

특히 HE_{11}(ν =1)인 경우가 광섬유의 기본모드가 되며, 광선은 z축에 거의 평행한 각도로 나선운동을 하며 전파한다. HE_{11}모드 및 HE_{21}모드의 전자계 분포는 그림 14와 같다.

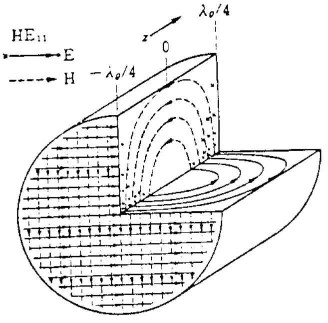


(a)

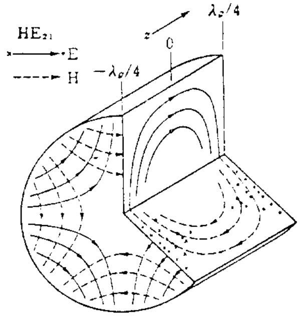


(b)

그림 13. (a) TE_{01} 모드 (b) TM_{01}모드



(a)



(b)

그림 14. (a) HE_{11}모드 (b) HE_{21}모드

(4) $EH_{\nu\mu}$ 모드($E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$, $\nu \geq 1$)

$$\frac{J_{\nu+1}(u)}{uJ_\nu(u)} + \frac{K_{\nu+1}}{wk_\nu(w)} = 0 \qquad (31)$$

차단 주파수 조건은

$$J_\nu(v_c) = 0,\quad (\nu \geq 1,\ v_c > 0) \qquad (32)$$

EH 모드계열에서는 EH_{11}이 가장 저차의 모드이기는 하나, 그림 15의 b-v 곡선에서 알 수 있듯이 전체 모드계열로 볼때는 고차모드에 불과하다.

HE모드와 EH모드는 모두 TE, TM 두 모드의 합성 형태이다. 다만 TE모드가 강세일때는 HE모드, TM모드가 강세일때는 EH모드로 분류한다. HE, EH 모드 공히 ν가 클수록 ϕ 방향의 주회 성분이 커지므로 나선운동의 비틀림 각도가 커진다.

이상의 해석 결과를 b-v 곡선으로 옮기면 그림 15와 같다.

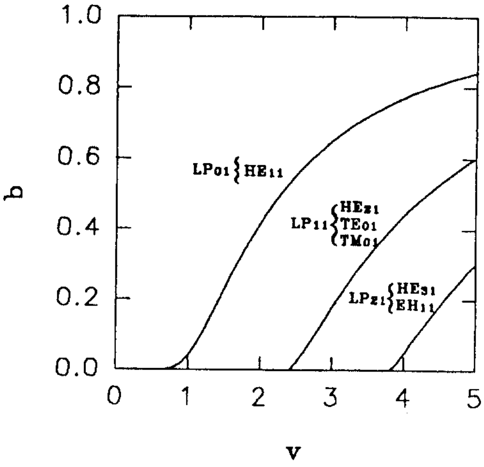


그림 15. 계단형 광섬유의 b-v 곡선

HE_{11}모드는 차단주파수 v_c=0인 기본모드임을 알수 있다. HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}은 축퇴되어 있으며 v_c=2.405인 2차 모드이다. 이로써 단일 모드 광섬유를 설계하기 위한 조건은 $k_0 a\sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$ 임을 알수 있다. b값이 크면 큰수록 광이 코어내로 집속하며, 광선의 전파각이 z축과 평행에 가까워진다. 그리고 광섬유의 구부림에서 방사손실이 적어지며, 클래드 부분의 구조결함으로 말미암은 산란손실이 적어진다.

TE_{01}, TM_{01}, HE_{21} 세모드의 축퇴현상은 횡면상의 전자계 분포가 달라 전파되어 나아가는 형태는 다를지라도 군속도는 같게 됨을 의미한다. 다모드 광섬유의 경우에서는 입사조건에 따라 광전력이 기본모드뿐만 아니라 2차모드인 세모드에도 적절히 분배될 것이다. 그러나 이 세모드의 전력들은 군속도가 같음으로 말미암아, 전파되는 도중 광섬유의 구부림이나 구조결함등이 있을시에는 서로 전력교환이 일어날 수 있다. 광섬유 도파로를 분류할때 TE, TM, HE, EH 등의 모드분류보다는 횡면의 선편파 전계분포를 중심으로 모드분류를 하는것이 더욱 바람직 할때가 많다. LP(Linerly Polarized) 모드라 분류하여 $LP_{m\mu}$의 파라미터 m은 "축방향으로 회전시켜 관찰했을때의 E_x(또는 E_y)의 변화의 수"를 표시하고 있다. 식(33)의 관계식으로 x, y 방향의 횡면전계는 얻어지며

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_\phi \end{bmatrix} \qquad (33)$$

LP모드 명명법에 따른 전자계 분포는 표 2와 같다.

표 2. LP모드 명명법과 전자계 분포

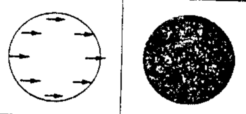
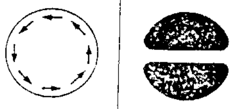
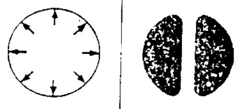
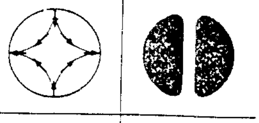
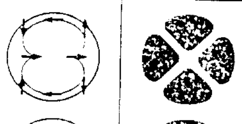
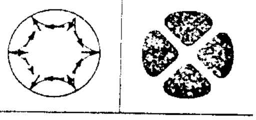
LP 모드 명명법	재래식 명명법	전계분포 / E_x의 강도분포
LP_{01}	HE_{11}	
LP_{11}	TE_{01}	
	TM_{01}	
	HE_{21}	
LP_{21}	EH_{11}	
	HE_{31}	

표 2의 LP_{01}모드는 HE_{11}모드로써 m = 0 즉, 선편파 전계의 ϕ방향 변화수가 없는 모드이다. LP_{11}모드는 TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}모드를 포함하고 있으며, 이들 축퇴모드들의 E_x전계 강도분포는 m = 1의 ϕ방향 변화수를 가지고 동일한 전력분포를 보이고 있다.

이상의 LP모드의 개념은 항상 약도파(weakly-guiding)조건을 가정했을때 성립하며, 약도파가 아닌 경우에는 축퇴된 위상정수가 분리되는 현상이 나타난다. 그러나 실용화 되어있는 모든 단일모드 광섬유는 약도파조건하에 제작되고 있으므로 그림15의 *b-v* 곡선은 항상 유효하다고 볼수 있다.

V. 맺는말

광통신을 이해하기 위해서 알아두어야 할 기초적인 사항들은 여러가지가 있다. 광도파원리와 전송특성이 그중의 하나이다. 광도파원리를 파악한다함은 파동방정식을 바탕으로 한 모드개념, 군속도, 분산의 이해를 의미한다. 광도파로 해석부분에서는 수동 및 능동 광소자에서 주로 사용되는 박막도파로, 채널도파로와 광통신의 전송매체인 광섬유를 간략하게 다루었다. 소개된 광도파로 원리는 여러가지 광소자들, 이를테면 광분파기/합파기, 모드변환기, 광필터, 광변조기 등의 설계에 직접 이용될 수 있다.

전송특성을 결정짓는 커다란 인자들은 도파원리를 바탕으로 한 분산과 손실로써, 이들은 광통신 시스템의 대역폭과 무중계 거리에 직접적으로 관련된다. 도파광의 모드개념과 해석에 중점을 두어 서술하느라 광섬유의 분산과 손실에 대하여 상세히 다루지 못했다. 광섬유의 특징, 전계분포, 각 모드 차단 주파수를 간략하게 서술하였으며, 단일모드 광섬유를 설계하기 위한 조건들을 살펴보았다.

參 考 文 獻

[1] T.Tamir, Guided - Wave Optoelectronics, 2nd Ed., Spring - Verlag, 1990.

[2] H. Nishihara et al, Optical Integrated Circuit, Mc Graw - Hill, 1985.

[3] M.J.Adams, An Introduction to Optical Waveguide, John Wiley & Sons Ltd., 1981

[4] R.L.Burden et al, Numerical Analysis, Prindle, Weber & Scmidt, 1981.

[5] J.N.Reddy , An Introduction to the FEM , Mc Graw-Hill Book Co, 1985.

[6] E.A.J. Marcatili, "Dielectic Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics" , Bell Syst. Tech. J. vol. 48, p207, September 1969.

筆 者 紹 介

金 昌 敏

1950年 4月 10日生

1975年 2月 서울대학교 전자공학과 공학사

1982年 2月 서울대학교 전자공학과 공학석사

1989年 8月 U. Florida 전자공학과 공학박사

1983年 5月 ~ 현재 서울시립대학교 전자공학과 부교수

주관심분야 : 집적광학, 전자파, 광파 및 양자전자, 광통신