

Bragg 격자구조가 집적된 편광 무의존성 방향성 결합기와 다중모드 간섭 결합기의 설계

호광훈[†]

한성대학교 정보통신공학과

Ⓣ 136-792 서울시 성북구 삼선동 2가 389번지

(2007년 8월 13일 받음, 2007년 9월 20일 수정본 받음)

Rib 형태의 전송구조로 구성된 편광 무의존성 방향성 결합기(DC)와 다중모드 간섭결합기(MMI)의 설계특성을 종방향 모드 전송선로 해석법(L-MTLT)을 이용하여 정확하게 비교 분석하였다. 두 전송모드들의 결합특성에 의존하는 편광 무의존성 DC 소자를 이용하여 다중모드들의 결합과 간섭특성을 나타내는 MMI 결합기가 설계될 수 있음을 보였다. 또한, 편광 무의존성 DC와 MMI 소자들의 결합효율을 결합길이와 파장의 변화에 따라 자세하게 비교 분석하였다. 그 결과를 기반으로 광통신용 소자에서 필터로 널리 사용 가능한 Bragg 격자구조가 집적된 편광 무의존성 DC와 MMI를 설계하고 그 필터특성을 처음으로 비교 분석하였다.

분석결과, TE와 TM 모드들 사이의 결합길이가 같도록 설계한 DC는 MMI보다 편광 무의존성 필터링 특성에 있어서 더욱 좋은 성능을 나타냈다. 그러나, 편광 무의존성 결합길이가 현저하게 작은 MMI가 DC보다 집적소자 소형화를 위하여 더욱 좋은 소자임을 보였다.

주제어 : Polarization-insensitivity, Directional coupler, Multimode interference coupler, Bragg gratings, Equivalent networks

I 서 론

방향성 결합기^[1](directional coupler: DC)와 다중모드 간섭 (multimode interference: MMI) 결합기는 광통신 분야에서 광 신호 처리를 위한 가장 중요한 소자들 중의 하나이다. 특히, MMI 결합기는 1995에 Soldano와 Penning^[2]에 의하여 그 전송특성이 자세하게 소개된 이후, 광전력 결합, 분리, 스위칭, 그리고 단순한 파장분할 다중화기(wavelength-division multiplexing: WDM)에 널리 사용되어 오고 있다. 그 이유는 MMI 결합기가 DC에 비하여 소형화가 가능하고, 편광에 의존하지 않는 무의존성(polarization-insensitive) 소자를 설계하기 위한 제작 허용오차(fabrication tolerance)가 매우 크기 때문이다. 그와 병행하여, rib형의 전송소자를 이용하여 제작 허용오차는 작지만 MMI 결합기 보다 편광 무의존성이 뛰어난 DC가 설계 가능함^[3]을 제안하여 왔다. 최근, 소자의 소형화를 위하여 이들 소자들을 광통신용 필터, 변조기, 그리고 공진기와 같은 기능성 광소자들과 함께 집적하려는 노력이 증가하고 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 그림 1에서 보듯이, 광 파장분할 다중화기(DWDM: dense wavelength division multiplexing)나 광 라우터(routers)와 같은 중요한 다기능 집적소자로 사용이 가능한 Bragg 격자구조가 집적된 편광 무의존성 DC와 MMI 결합기를 설계하고 그 전송특성을 종방향 모드전송선로 해석법(longitudinal modal transmission-line theory: L-MTLT)^[3]과 등가 망 해석법(equivalent network approach: ENA)^[4]에 기초하여 정확하게 분석하였다. 일반적으로 전송

신호들이 불규칙한 편광특성을 나타내는 광통신 시스템에서는 이와 같은 집적소자의 제작이 매우 중요하다 할 수 있다.

이 제작 가능한 두 소자 중에서 우선 DC의 결합특성과 파장 의존성을 분석하였고, 이 분석개념과 과정을 확대하여 MMI 결합기의 결합특성과 파장 의존성을 해석하였다. 왜냐

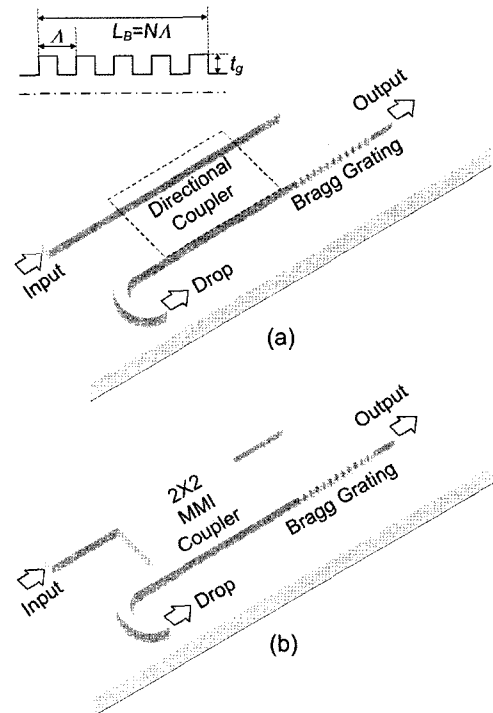


그림 1. Bragg 격자구조가 집적된 편광 무의존성.
(a) 방향성 결합기
(b) 다중모드 간섭 결합기

[†] E-mail: kwangho@hansung.ac.kr

하면, DC의 상/하향 전송 도파로 사이의 영역(그림 2에서 너비 W_s 영역)이 채워짐에 따라 구조적으로 DC는 MMI 결합기의 전송구조로 변환될 수 있으며(그림 4 참조), 그 변화과정에서 발생하는 간섭모드들의 수와 그 특성을 분석하면 MMI 결합기의 결합특성을 DC 전송특성으로부터 유추할 수 있기 때문이다. 이와 관련된 내용을 4장에서 자세하게 언급하였다. 결국, 설계된 편광 무의존성 DC와 MMI 결합기를 광필터로 널리 사용되는 Bragg 격자구조와 집적하여 그 필터특성을 분석하였으며, 그 설계기법을 자세하게 제시하였다. 또한, 제안된 집적소자를 제작할 때 발생하는 제약사항 (limitations)들을 언급하였다.

II. DC와 MMI 결합기의 모드특성

DC와 MMI 결합기와 같이 rib형 광 전송구조로 형성된 방향성 결합기는 rib형 도파로의 높이와 그 전송 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합길이가 증가하거나 감소한다. 이러한 변수들에 의존하는 DC/MMI 결합기가 그림 2에 자세하게 도시되어 있다.

그림 2(b)에서 보듯이, DC/MMI 결합기는 두께 $t_s = 2.0 \mu\text{m}$ 와 $t_{dn} = 0.5 \mu\text{m}$ 을 갖는 굴절률 $n_s = 3.17$ 인 InP, 두께 $t_f = 0.5 \mu\text{m}$ 와 설계변수로 사용될 굴절률 n_f 인 InGaAsP, 두께 $t_{up} = 1.5 \mu\text{m}$ 와 굴절률 $n_c = 3.17$ 인 InP 층들로 구성된 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 또한, 입력 도파로와 cross/bar 도파로들의 폭은 $W_g = 1.2 \mu\text{m}$ 로 설계하였으며, DC/MMI 결합기의 상/하향 도파로들 사이의 결합영역 폭은 $W_s = 1.6 \mu\text{m}$ 로 선택하였다. 그때 광 DC/MMI 결합기에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 준(quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 고려되는 전파방향이 z-축이라면 우리는 이 모드들을 각각 TE_{nm}^z 형 또는 TM_{nm}^z 형 혼성 모드(hybrid mode)라 정의한다.

그림 2(a)에서 동작파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 모드가 DC/MMI 결합기의 y-축을 따라 입사한다고 가정하자. 이때, y-축 방향에서의 전파상수는 다음과 같다.

$$k_x^{(j)2} + k_y^2 + k_z^2 = k_x^{(j)2} + \beta^2 = k_o^2 \epsilon_j \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_j = n_j^2$ 는 j-번째 전송 층의 그 유전율을 나타내며, β 는 yz-평면상의 그 전파 상수이다. 그때, 아래와 같은 L-MTLT의 ENA^[4]에 기초한 횡 방향 공진 조건(transverse resonance condition)을 이용하면, 그 전파 상수 β 가 결정된다.

$$Z_{up}(\beta) + Z_{dn}(\beta) = 0 \quad (2)$$

여기서, $Z_{up}(\beta)$ 과 $Z_{dn}(\beta)$ 은 x-축 상의 임의의 위치에서 각각 위와 아래로 본 그 임피던스를 나타내며, 그 축을 따라 구성된 등가 전송선로의 그 전파상수와 특성 임피던스는 다음과 같다.

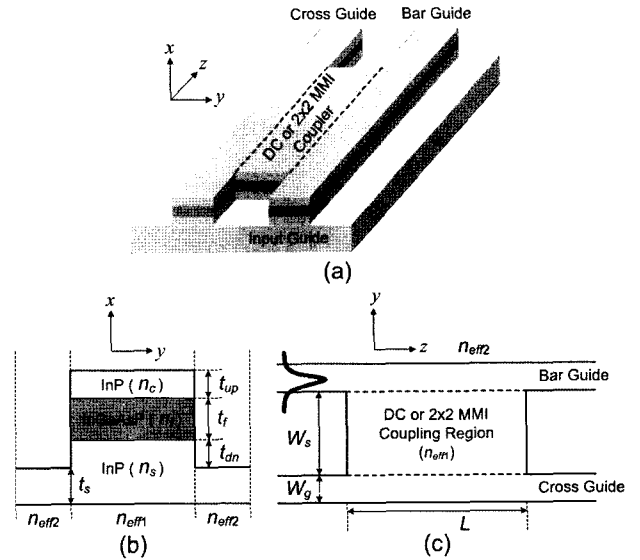


그림 2. (a) DC 또는 MMI 결합기의 3D기하학적 구조
(b) DC 또는 MMI 결합기를 구성하는 rib 도파로의 단면도
(c) 전체적인 2D 평면도

$$Z_j = \begin{cases} \omega\mu / k_x^{(j)} & \text{for } TM_{nm}^z \text{ mode} \\ k_x^{(j)} / (\omega\epsilon_0\epsilon_j) & \text{for } TE_{nm}^z \text{ mode} \end{cases} \quad (3)$$

결국, xy-평면 상에서 x-축 방향으로 적용된 식 (2)의 고유치 문제로부터 각 영역들의 그 유효 굴절률(n_{eff})을 결정할 수 있으며, 그림 2(c)와 같은 yz-평면 상에 구성된 등가 2-D 구조를 얻을 수 있다. 그러므로, 등가화된 이 2-D 전송구조에 L-MTLT를 적용하여 DC/MMI 결합기에서 전파하는 혼성 모드들 간의 결합특성과 그 편향 무의존성을 정확하게 분석할 수 있다.

III. DC/MMI 결합기의 결합특성

그림 2(c)에서 보듯이 DC/MMI 결합기를 통하여 전파하는 필드는 x-축 상의 변화가 없고, 입력 모드는 상향 도파로를 통하여 입사 되어 cross나 bar 도파로를 통하여 전송된다고 가정하였다. 그때, 식 (2)에 주어진 등가 전송선로의 횡 방향 공진조건을 z 방향의 전파상수 k_z 에 대하여 적용하면 다음과 같은 입/출력 단에서의 TE_{nm}^z 모드에 대한 정확한 전개 성분을 얻을 수 있다.

$$E_r(y, z) = V_r(z)e_r(y) \quad (4)$$

또한, DC/MMI 결합기에서 전파하는 그 전개는 선형적으로 결합된 N개의 전파모드들의 중첩으로 표현된다.

$$E_{dc/mmi}(y, z) = \sum_{m=1}^N V_m(z)e_m(y) \quad (5)$$

여기서, r 은 입/출력 영역에서 각각 in 또는 out , $V_m(z)$ 는 m -번째 모드의 모드 전압, 그리고 $e_m(y)$ 는 m -번째 모드의 횡방향 필드분포를 각각 나타낸다. 일반적으로, DC의 경우에는 결합특성을 결정하기 위하여 2개($N=2$)의 우/기 중첩모드 (even/odd supermodes)를 사용한다.

결국, 입력 경계면($z=0$)에서 식 (4)와 (5)의 전계 분포에 대하여 경계조건을 적용하면 다음과 같은 등가 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{in}(0)e_{in}(y) \cong \sum_{m=1}^N V_m(0)e_m(y) \quad (6)$$

여기서, V_{in} 은 입력 단에 걸리는 모드 전압이며, e_{in} 은 입력 단에서 입사되는 횡방향 필드 분포이다. 그와 같은 원리로, 결합기의 입력 단에서 여기된 전송 모드는 길이 $z=L$ 만큼 진행한 후 출력 단에서 아래의 경계조건을 만족하며 출력된다.

$$V_{out}(L)e_{out}(y) \cong \sum_{m=1}^N V_m(L)e_m(y) \quad (7)$$

여기서, $k_{z,m}$ 은 각 중첩 모드들의 그 전파 상수를 나타낸다. 그러므로, 필드 정규화 직교조건과 모드 정합조건^[5]을 식 (6)과 (7)에 대입하고 정리하면 아래와 같은 입력 전압에 대한 출력 전압의 비율을 얻을 수 있다.

$$\frac{V_{out}(L)}{V_{in}(0)} = \sum_{m=1}^N (T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z,m}L}) \quad (8)$$

그때, 입/출력 경계면에서 발생하는 입/출력 변환상수(input/output transformer coefficient)는 아래와 같이 정의된다.

$$T_{in,m} = \int_{cs} e_{in}(y)e_m^*(y)dy, T_{m,out} = \int_{cs} e_m(y)e_{out}^*(y)dy \quad (9)$$

결국, TE_{nm}^z 형 모드에 대한 DC/MMI 결합기의 입/출력전력 비율인 결합효율은

$$\eta_{TE} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \frac{V_{out}(L)}{V_{in}(0)} \right|^2 \quad (10)$$

으로 정의된다. 여기서, $k_{z,in}$ 과 $k_{z,out}$ 은 각각 입/출력 영역에서 TE_{nm}^z 형 모드의 전파상수를 나타낸다. 같은 방법으로 TM_{nm}^z 형 모드가 z -축을 따라 전파하는 경우에 그 모드들간의 결합 효율을 정의할 수 있다.

이 정의된 식 (10)의 결합효율을 갖는 DC/MMI 결합기는 그림 3에서 보듯이 집적된 Bragg 격자구조를 나타내는 등가 전송선로 망과 연결되어 광필터로서 동작한다. 그때, Bragg

격자구조에 입력되는 입력전력은 $P_{in,B} = |V_{in,B}(L_1)|^2/Z$ 와 같이 표현할 수 있고, 만일 DC/MMI 결합기와 Bragg 격자구조를 연결하는(그림 3에서 L 과 L_1 사이) 전송선로의 전파상수 $k_{z,out}$ 가 실수이면(즉, 손실과 이득이 없는 전송선로이면) $P_{in,B} = P_{out}$ 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

그러므로, DC/MMI 결합기의 출력과 같은 Bragg 격자구조의 입력전력은 아래와 정의된 전송선로 방정식에 의존하여 Bragg 격자구조 내에서 진행된다.

$$V(z) = V_f \left[e^{ik_{eq}z} + \Gamma(0)e^{-ik_{eq}z} \right] \quad (11)$$

여기서, k_{eq} 은 Bragg 격자구조의 등가 전파상수^[3]이다. 그때, $z=L_1$ 에서 Bragg 격자구조에 입사된 입력전력은 그 입력경계면에서 아래와 같은 관계식을 만족한다.

$$V_{in,B}(1 + \Gamma_{in}) = V_f \left[e^{ik_{eq}L_1} + \Gamma(0)e^{-ik_{eq}L_1} \right] \quad (12)$$

여기서, $z=L_1$ 에서 오른쪽으로 들여다본 입력 반사계수는

$$\Gamma_{in} = -\frac{\Gamma_R(1 + e^{2ik_{eq}L_B})}{1 + \Gamma_R^2 e^{2ik_{eq}L_B}} \quad (13)$$

와 같고, $z=L_2$ 에서 오른쪽으로 들여다본 부하 반사계수는

$$\Gamma_R = \Gamma(0)e^{-2ik_{eq}L_B} = \frac{Z - Z_{eq}}{Z + Z_{eq}} \quad (14)$$

와 같이 정의된다. 그때, 식 (12)-(14)로부터 $z=0$ 에서 입사된 입력전력에 대한 $z=L_1$ 에서의 반사전력의 비율인 반사도(reflectance)과 R 에서의 $z=L_2$ 출력전력의 비율인 투과도(transmittance) T 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

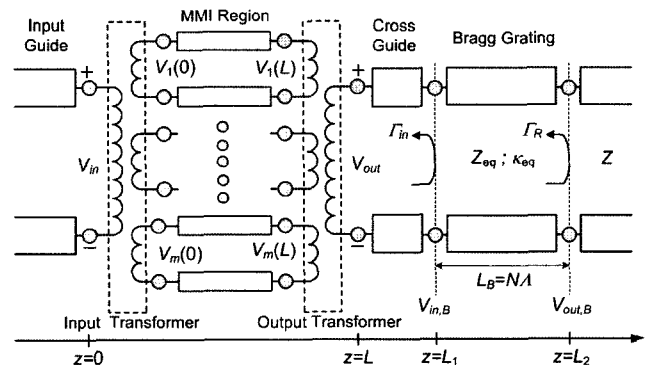


그림 3. 그림 1에 보여준 Bragg 격자구조가 집적된 DC/MMI 결합기의 등가 전송선로 망.

$$R = \frac{P_{ref,B}}{P_{in}} = |\Gamma_{in}|^2 \eta_{TE}$$

$$T = \frac{P_{tr,B}}{P_{in}} = \left| \frac{(1 + \Gamma_{in})(1 + \Gamma_R e^{-2i\kappa_{eq}L_1}) e^{i\kappa_{eq}L_B}}{1 + \Gamma_R e^{-2i\kappa_{eq}L_1} e^{2i\kappa_{eq}L_B}} \right|^2 \eta_{TE} \quad (15)$$

여기서, Bragg 격자구조의 반사전력과 출력전력은 $P_{ref,B} = |\Gamma_{in}|^2 P_{in,B}$, $P_{tr,B} = |V(L_2)|^2 / Z$ 와 같이 정의된다.

IV. 편광 무의존성 DC/MMI 결합기의 설계기준

그림 4(a)에서 보듯이, DC는 2개의 평행하고 대칭인 상/하향(bar/cross) 도파로로 구성된다. 광신호가 입력 도파로를 통하여 입사되었을 때, 그 신호는 전파상수가 $k_{z,ev}$ 와 $k_{z,od}$ 인 우/기 중첩모드들을 결합영역에 발생시킨다. 이 두 중첩모드들은 결합영역에서 서로 간섭하여 입사된 광신호를 식 (10)의 결합효율에 의존하여 결합길이(coupling length) L_c 에서 상향 또는 하향 도파로로 그 전력을 모두 전달하게 된다. 광통신

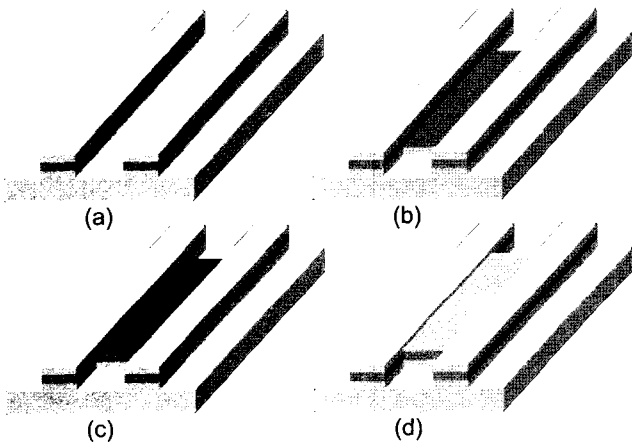


그림 4. 상/하향 도파로 사이의 간격이 채워짐에 따른 DC에서 MMI로의 변환과정 (a)-(d).

용 DC 소자의 설계에 있어서 결합길이는 소자의 소형화를 위하여 가능한 작도록 설계해야만 하는 중요한 설계변수이다. 더욱이, 광통신 시스템에서는 전송신호들이 불규칙한 편광특성을 나타낼 수 있기 때문에 편광 무의존성 DC의 설계가 매우 중요하며, 이 경우 TE_{nm}^z 모드와 TM_{nm}^z 모드들의 결합길이가 서로 같도록 설계해야만 한다.

편광 무의존성 DC를 설계하기 위하여 고려할 수 있는 다양한 설계변수 중에서 본 논문에서는 rib형 도파로의 코어 굴절률 n_f 에(그림 2(b) 참조) 의존하는 모드들의 결합길이를 분석하였다. 그림 5(a)에서 보듯이, 결합길이는 넓은 대역에 퍼져 나타나며, 코어 굴절률이 줄어들어 따라 두 모드의 결합길이는 현저하게 줄어들었고 결국에는 코어 굴절률 $n_f = 3.32$ 모드들의 결합길이가 서로 같은 임계값(critical value)이 존재하였다. 이는 TM 모드가 TE 모드에 비하여 코어 굴절률 변화에 더욱더 민감한 특성 나타내기 때문에 발생하는 것이다. 그러므로, 이 임계값에서 설계된 DC는 편광 무의존성 특성을 나타내며, 전파하는 두 모드들은 같은 결합효율을 갖고 출력 도파로를 통하여 방출될 것이다(그림 6(a) 참조). 또한 코어 굴절률이 $n_f = 3.32$ 이고 결합길이가 $L = 1580 \mu\text{m}$ 일 때, 그림 5(b)에서 보듯이 파장의 변화에 따른 두 모드들의 결합효율은 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 에서 $1.6 \mu\text{m}$ 까지 90% 이상의 거의 같은 효율을 갖고 전파하는 광대역(broadband) 특성을 나타내었다.

지금까지 언급한 DC 설계특성에 기초하여, DC의 상/하향 도파로 사이의 결합영역(즉, 폭 W_c 를 갖는 영역)이 연속적으로 채워짐에 따라 DC가 어떻게 MMI 결합기의 설계특성으로 발전할 수 있는지 고려하여 보았다. 그림 4(a)-(d)에서 보듯이, 전송구조가 DC에서 MMI 결합기의 형태로 변환에 따라 DC에서 전파하는 TE_{11}^z 모드와 TM_{11}^z 모드들의 결합효율이 어떻게 변화되는지 그 과정을 비교 분석하였다. 그 변환 과정에 대응하는 결합효율의 변화가 그림 6에 자세하게 도시되어 있다. 그림 6(a)에서 보듯이, 편광 무의존성 임계값에서 설계된 DC는 결합길이 $L = 1580 \mu\text{m}$ 에서 TE_{11}^z 모드와 TM_{11}^z

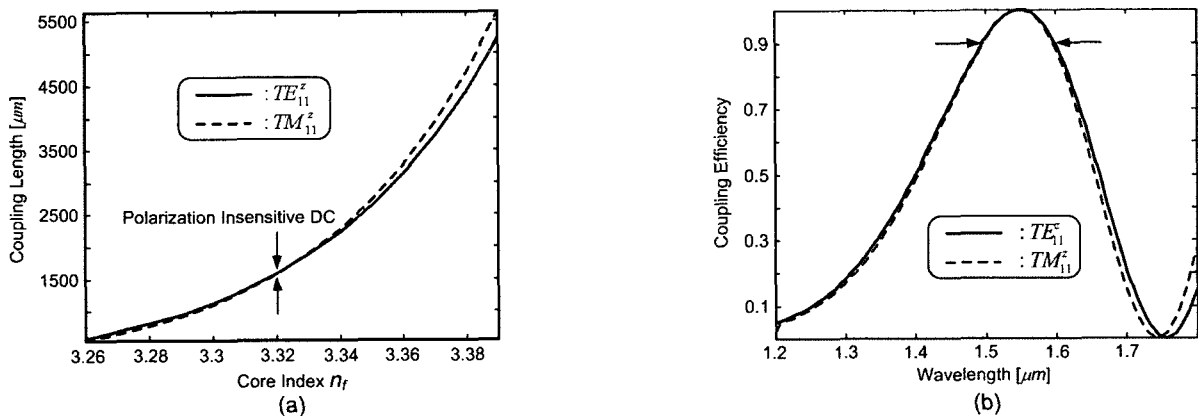


그림 5. (a) 코어의 굴절률에 따른 TE, TM 모드들의 결합길이 변화 (b) 파장에 따른 결합효율의 변화

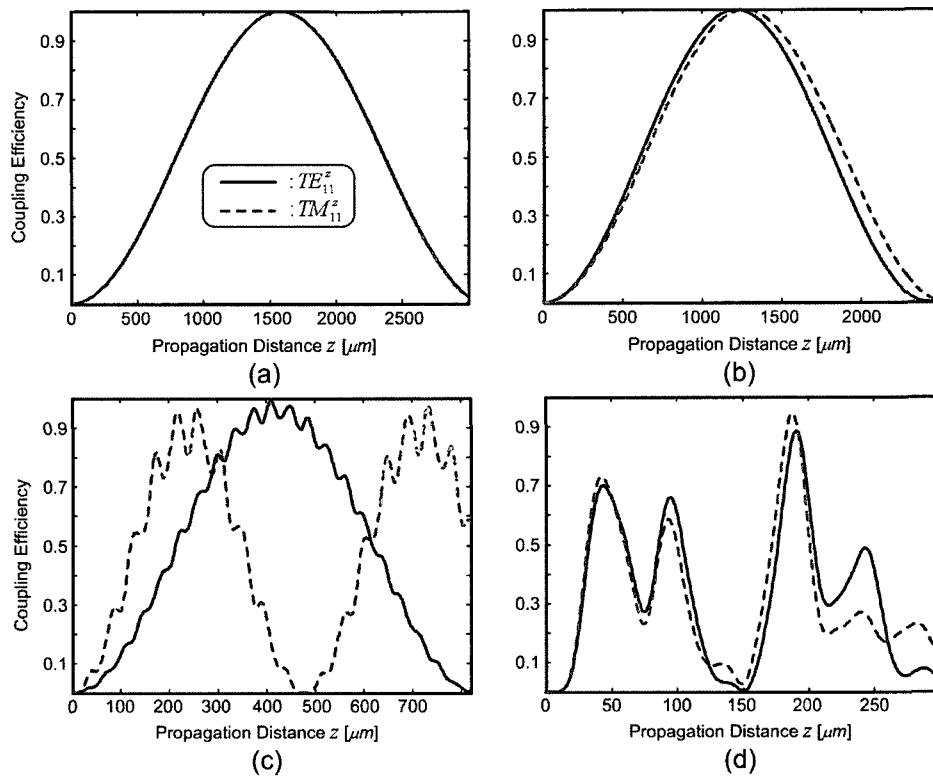


그림 6. 그림 3(a)-(d)에 도시한 DC에서 MMI 결합기로 변환하는 과정의 각 경우에 대한 결합효율의 변화.

모드가 하향(cross)도파로를 통하여 같은 전력의 신호를 출력함을 잘 보여주고 있다.

더욱이 그림 4(b)와 6(b)에서 보듯이, 결합영역이 두께 t_{in} 의 InP로 채워졌을 경우 DC에서 전파하는 두 모드들의 전파 상수는 서로 다른 값을 갖기 시작하며, 이로 인하여 두 모드들의 결합길이는 임계값으로부터 서로 다르게 편이되기 시작한다.

또한, 그림 4(c)와 6(c)에서 보듯이, 결합영역이 두께 t_{in} 와 t_f 의 InP와 InGaAsP로 채워졌을 경우 DC의 결합효율을 지배하는 중첩모드들의 수가 $N=2$ 에서 $N=3$ 으로 증가하였으며 그 결과 리플 형태(ripple pattern)의 결합효율 특성이 나타났다. 그러므로, 결합효율은 더 이상 전파하는 위기 중첩모드들 사이의 결합으로 얻을 수 없으며, 다중 중첩모드들 사이의 간섭특성에 의하여 결정하여야 한다. 즉, MMI 결합기의 전파특성인 다중모드 간섭현상이 발생하게 되며, 그 결과 그림 6(b)와 (c)에서 비교할 수 있듯이 결합길이의 현저한 감소가 지속적으로 발생하게 된다.

이와 같은 현상은 그림 4(d)와 6(d)에서 보듯이, 결합영역이 두께 t_{in} 와 t_f 의 InP와 InGaAsP로 채워지고 그 위에 두께 $0.5 \mu\text{m}$ 의 InP가 에칭(etching)되었을 때 더욱 현저하게 나타났다. 이 구조에서 결합효율을 지배하는 중첩모드들의 수는 $N=4$ 로 증가하였으며, 이들 중첩모드들은 서로 간섭하여 MMI 결합기와 유사한 불규칙한(즉, 비주기적인) 결합효율 변화를 나타내었다. 그러나, 전파하는 TE_{11}^z 모드와 TM_{11}^z 모드의 그룹 속도(group velocity)가 서로 유사하게 변하여 두

모드들의 결합효율 변화가 편광 무의존성 소자특성에 수렴되는 현상을 보였다.

결국, 위에 분석한 특성들에 기초하여 그림 2(a)에 도시한 MMI 결합기의 편광 무의존성을 분석하였다. 그림 7(a)에서 보듯이, 상/하향 도파로를 통하여 출력되는 결합효율은 상향도파로에서 입사된 광신호가 MMI 결합영역에 발생시킨 5개의($N=5$) 중첩모드들이 상호 간섭하여 결정된 것이며, TE_{11}^z 모드와 TM_{11}^z 모드들은 결합길이 $L=185.5 \mu\text{m}$ 에서 서로 일치하는 편광 무의존성 임계값을 나타내었다(그림 7의 확대한 삽입도 참조). 또한 $n_f=3.32$ 이고 $L=185.5 \mu\text{m}$ 일 때, 그림 7(b)에 도시한 스펙트럼 분석에서 보듯이, 두 모드들의 결합효율은 그림 5(b)에 도시한 DC의 스펙트럼과 유사한 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 에서 $1.62 \mu\text{m}$ 사이에서 90% 이상의 거의 비슷한 효율을 갖고 전파하는 광대역 특성을 나타내었다. 그러나, DC의 경우와 같이 두 결합효율이 같은 완전한 편광 무의존성 특성은 오직 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 에서만 나타났다. 그러므로, MMI 결합기는 DC에 비하여 현저하게 짧은 결합길이로 인하여 다른 광소자와의 집적 시에 소형화가 가능하나 광대역에 걸쳐 발생하는 편광 의존성 손실이 DC에 비하여 매우 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

일반적으로, MMI 결합기는 DC에 비하여 더욱더 좋은 편광 무의존성 특성을 나타낸다는 언급^[6]에 반하여, 본 논문에서 분석한 결과와 같이 만일 DC도 편광 무의존성 임계값을 갖도록 설계하면 MMI 결합기보다 좋은 편광 무의존성 소자로서 사용이 가능한 것이다.

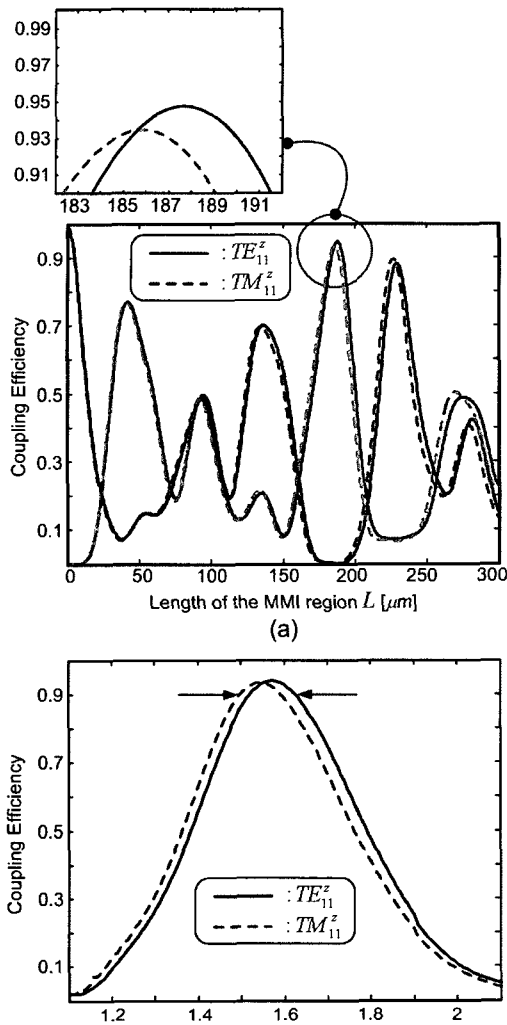


그림 7. MMI 결합기의 (a) 전파길이에 따른, (b) 파장에 따른 결합효율의 변화.

V. Bragg 격자구조가 집적된 소자의 필터특성

앞 절에서 L-MTLT를 이용한 편광 무의존성 DC와 MMI 결합기의 설계특성을 분석하였다. 본 절에서는 이 얻어진 설계특성에 기초하여 그림 1에서 보듯이 Bragg 격자구조가 집적된 DC 또는 MMI 결합기의 필터특성을 분석하고자 한다. 이때 구성한 Bragg 격자구조의 주기는 $\Lambda = 0.72 \mu\text{m}$, 격자높이는 $t_g = 0.5 \mu\text{m}$, 그리고 격자 개수는 $N = 1000$ 로 선택하였다. 그러므로, 설계된 Bragg 격자구조의 길이는 $L_B = 720 \mu\text{m}$ 이다.

이와 같이 설계된 집적소자의 등가 전송선로를 그림 3에 자세하게 도시하였으며, 우선 이 선로로부터 유도할 수 있는 Bragg 격자구조의 투과전력 비율 $P_{r,B} / P_{i,B}$ 을 분석하였다. 분석결과 얻어진 필터링 특성을 DC와 MMI 결합기의 결합효율 스펙트럼(그림 5(b)와 7(b) 참조)과 함께 그림 8에 도시하였다. 그림에서 보듯이, TE_{11}^z 모드와 TM_{11}^z 모드가 Bragg 격자구조를 투과하면서 발생하는 파장 응답 스펙트럼의 중

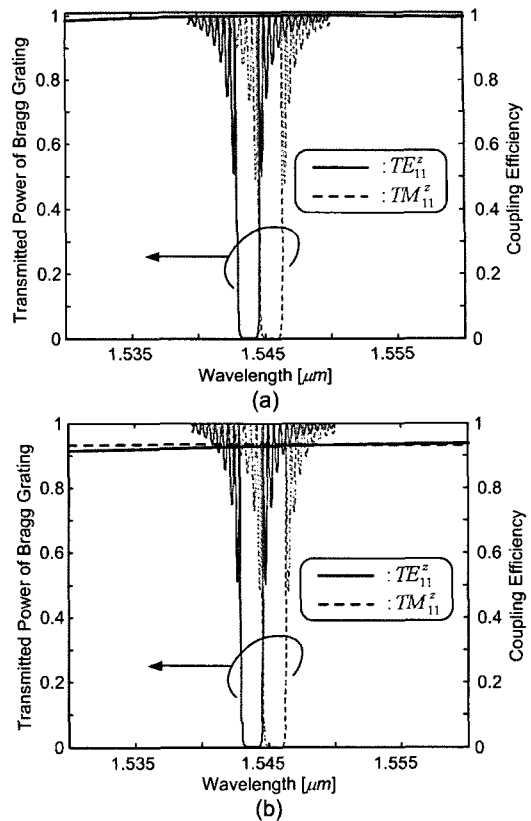


그림 8. Bragg 격자구조의 투과도 변화와 함께 도시한 (a) DC와, (b) MMI 결합기의 파장에 따른 결합효율.

심 주파수는 각각 약 1543.8 nm와 약 1545.5 nm로 $\Delta\lambda \approx 1.7$ nm의 채널 간격(channel spacing)을 나타냈으며, 그 3 dB 대역폭(bandwidth)은 약 1.7 nm로 같은 특성을 보여 주었다. 이 얻어진 특성은, ITU(International Telecommunications Union)에서 표준으로 권고하는 채널 간격 광통신용 DWDM에 사용하기에 적합한 필터 소자이나, 채널간격과 대역폭이 서로 같은 값을 나타내므로 근접한 채널 사이의 에일리어싱(aliasing)에 기인한 신호 왜곡 현상이 어느 정도 발생할 것으로 판단된다.

결국, 그림 3의 등가 전송선로망에 기초한 식 (15)에서 보듯이, DC와 MMI 결합기를 통하여 전달된 정규화 출력전력(즉, 결합효율)은 Bragg 격자구조에 입력전력으로 입사되어 필터링된 최종출력을 발생하게 된다. 그림 9(a)에 도시한 Bragg 격자구조와 집적된 DC의 전체 투과도 스펙트럼에서 보듯이, 이 집적소자는 통과대역(passband)에서 발생하는 손실이 거의 없는 반면에, Bragg 격자구조와 집적된 MMI 결합기의 스펙트럼은 그림 9(b)에서 보듯이 약 10%의 손실이 발생함을 보여 주고 있다. 이와 같은 결과는 그림 8로부터 쉽고 명확하게 예측할 수 있다. 왜냐하면, 그림 9는 그림 8에 함께 도시한 결합효율과 투과전력의 곱으로부터 얻을 수 있기 때문이다. 그러므로, 편광 무의존성 DC로 구성된 집적소자가 MMI 결합기로 구성된 집적소자에 비하여 매우 좋은 필터특성을 갖는다고 할 수 있다.

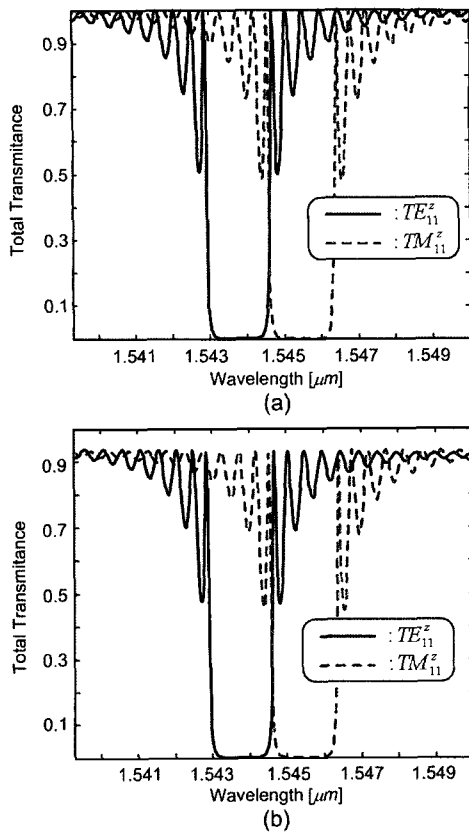


그림 9. Bragg 격자구조와 집적된 (a) DC와, (b) MMI 결합기의 파장에 따른 전체 투과도 변화.

VI. 결 론

L-MTLT를 이용하여 rib 형태의 전송구조로 구성된 편광 무의존성 방향성 결합기(DC)와 다중모드 간섭결합기(MMI)의 설계특성을 정확하게 비교 분석하였다. 우/기 중첩모드들의 결합특성을 나타내는 편향 무의존성 DC 소자 설계특성으로부터 다중모드들의 결합과 간섭특성을 나타내는 MMI 결합기가 설계될 수 있음을 보였으며, 편향 무의존성 DC와 MMI 소자들의 결합효율을 결합길이와 파장의 변화에 따라 자세하게 비교 분석하였다. 그 결과를 기반으로 광통신용 소자에서 필터로 널리 사용하는 Bragg 격자구조가 집적된 편향 무의존성 DC와 MMI를 설계하고 그 필터특성을 처음으로 비교 분석하였다.

분석결과, DC는 코어 굴절률 $n_f = 3.32$ 에서 두 모드들의 결합길이가 서로 같은 임계값이 존재하였으며, $\lambda \approx 1.5 \mu\text{m}$ 부터

$1.6 \mu\text{m}$ 의 광대역에서 90% 이상의 결합효율을 나타내었다. 또한, MMI 결합기는 DC보다 매우 짧은 결합길이 $L = 185.5 \mu\text{m}$ 에서 서로 일치하는 편광 무의존성 임계값을 나타내었으나, 주파수가 $\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$ 로부터 편이됨에 따라 편광 의존성이 증가함을 보였다.

결국, Bragg 격자구조와 집적된 DC구조가 MMI 결합기 구조보다 편광 무의존성 필터링 특성에 있어서 더욱 좋은 성능을 나타냈으나, 집적소자의 소형화 특성에 있어서는 편광 무의존성 결합길이가 현저하게 작은 MMI 결합기 구조가 DC 구조보다 더욱 좋은 소자임을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2007학년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] R. A. Forber and E. Marom, "Symmetric directional coupler switches," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, pp. 911-919, 1986.
- [2] L. Soldano and E. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, pp. 615-627, 1995.
- [3] K. C. Ho and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," *IEICE Trans. Electronics*, vol. E88-C, pp. 270-274, 2005.
- [4] S. T. Peng and A. Oliner, "Guidance and Leakage Properties of a Class of Open Dielectric Waveguides: Part I-Mathematical Formulations," *IEEE Trans. MTT*, vol. 29, no. 9, pp. 843-855, 1981.
- [5] 손석용, 호광춘, 김영권, "광통신용 테이퍼 방향성 결합기의 설계 특성," *대한전자공학회지*, 제 36권 11호, pp. 18-26, 1999.
- [6] M. Rajarajan, B. M. A. Rahman, and K. T. V. Gratten, "A rigorous comparison of the performance of directional couplers with multimode interference devices," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 243-248, 1999.

Design of Polarization-Insensitive Directional Couplers and Multimode Interference Couplers Integrated with Bragg Grating Waveguide

Kwang-Chun Ho[†]

Dept. of IC Eng., Hansung University, Seoul 136-792, Korea

[†]*E-mail: kwangho@hansung.ac.kr*

(Received August 13, 2007, Revised manuscript September 20, 2007)

This paper presents a rigorous comparison of the design characteristics of polarization-insensitive directional coupler (DC) and multimode interference (MMI) coupler based on rib type waveguides, by using longitudinal modal transmission-line theory (L-MTLT). It shows that the multimode mixing and interference property of MMI can be structurally designed through the continuous evolution of the two-mode coupling property of DC. It also compares and analyzes the coupling efficiency along with the coupling length and the wavelength between polarization-insensitive DC and MMI. From the design properties obtained, it demonstrates for the first time the integration of polarization-insensitive DC or MMI with a Bragg grating and evaluates precisely the filtering characteristics.

The numerical results reveal that the DC, as long as it is designed to have the same coupling length for TE and TM modes, has better performance than the MMI in polarization-insensitive filtering behaviour. However, it shows that the MMI with much less coupling length than DC is preferred in the miniaturization of integrated devices.

OCIS code : 060.1810, 130.3120, 230.5440.