

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.4.187>

IIBC 2017-4-24

비대칭 격자 구조형 방향성 결합기의 결합효율

Coupling Efficiency of Asymmetric Grating-Assisted Directional Coupler

호광춘*

Kwang-Chun Ho*

요약 정확한 종방향 모드 전송선로 이론을 이용하여 비대칭 격자 구조형 방향성 결합기의 최대 전력전송 특성을 정확하게 분석하였다. 정확한 해석적 전송선로 수식과 대칭/비대칭 모드 사이의 간섭특성에 의존하는 결합효율을 정의하였으며, 전파 거리에 따른 TE 모드의 전력변화를 수치해석 하였다. 수치해석 결과, 비대칭 GADC에서 최대 전력전송은 전형적인 위상 정합조건 Λ_{ph} 에서 발생하지 않았으며, 전파하는 중첩모드들의 삽입손실이 서로 같은 격자주기 Λ_{eq} 에서 발생하였다. 더욱이, 격자의 비대칭 특성이 대칭 특성으로 변함에 따라 결합길이는 줄어들었으며, 전력전송 효율은 증가함을 보였다.

Abstract Rigorous longitudinal modal transmission-line theory (L-MTLT) is applied to analyze maximum power transfer in asymmetric grating-assisted directional couplers(A-GADC). By defining a coupling efficiency amenable to rigorous analytical solutions and interference between symmetric and asymmetric supermodes, the power exchange of TE modes as a function of propagation distance is numerically evaluated. The numerical result reveals that maximum power transfer occurs at a grating period Λ_{eq} , in which the insertion loss of supermodes is equal to each other. That is, it is generally different from conventional phase-matching condition of GADC. Furthermore, as the asymmetric profile of grating change to symmetrical profile, the coupling length decreases and the coupling efficiency for power transmission increases.

Key Words : Asymmetric GADC, Coupling efficiency, Supermodes

1. 서론

격자 구조형 방향성 결합기 (Grating-assisted directional coupler: GADC)는 1970년대 초부터 파장 선택 필터를 설계하기 위한 소자로 연구되어 왔다^[1]. 결합 영역에서의 기하학적 파형 (geometric corrugation)^[2] 또는 굴절률 변조를 사용한 여러 형태의 결합기가 구현되었다. GADC에 대한 첫 번째 합성 기법은 Alferness and Cross^[3]에 의하여 제안되었으며, 약한 결합 특성을 분석

하기 위하여 스펙트럼 응답과 공간 결합 함수 사이의 푸리에 변환 관계를 사용하였다. 또한, 변이 최적화 방법 (Variational optimization method), 결합 모드이론 (Coupled mode theory: CMT)^[4], 전달 행렬 해석법 (Transfer matrix method: TMM)이 GADC의 전력결합과 분산특성을 분석하기 위하여 모드 정합기술 (Mode-matching technique)에 기초하여 사용되어 왔다^[5].

이들 해석법들은 소자 내에서 전송되는 모드들이 서

*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자: 2017년 2월 7일, 수정완료: 2017년 6월 25일
게재확정일자: 2017년 8월 11일

Received: 2 February, 2017 / Revised: 25 June, 2017 /

Accepted: 11 August, 2017

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

Dept. of Information and Communications Engineering, Hansung University, Korea

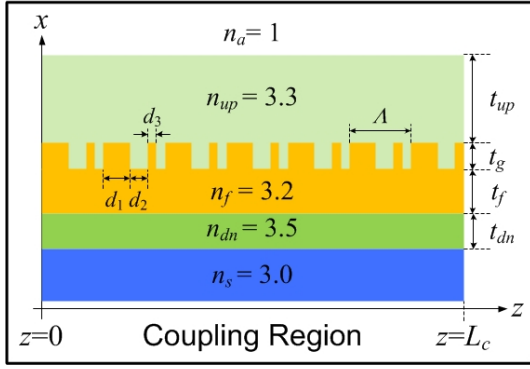


그림 1. 비대칭 GADC의 기하학적 구조.

Fig. 1. Geometric configuration of asymmetric GADC

로 직교특성을 만족한다는 가정 하에 적용된 분석법으로, 오직 주기적인 섭동 (perturbation)이 약하거나 결합되는 도파로 들의 전파특성이 유사할 때 정확한 수치해석 결과를 제공한다. 그러므로 격자 섭동이 강하거나 비대칭 격자구조와 같이 삽입손실 (Insertion loss)이 큰 구조로 구성된 GADC를 수치 해석하기에는 정확성이 다소 떨어질 수 있다. 특히, 본 논문에서 제시한 비대칭 GADC와 같이 누설 (leaky) 특성이 강한 소자의 분석은 매우 어렵다.

이를 위하여 본 논문에서는 정확한 종방향 모드 전송선로 이론 (Longitudinal modal transmission-line theory; L-MTLT)^[6]을 사용하여 제안한 비대칭 GADC의 광학적 전파특성들을 정확하고 쉽게 분석하였다. 먼저, 2장에 L-MTLT에 기초한 비대칭 GADC에서 전파하는 중첩모드 (supermodes)들의 분산특성을 분석하였고, 모드들의 결합특성을 해석하기 위한 결합효율 (Coupling efficiency)을 유도하였다. 다음으로, 3장에 비대칭 격자 주기에 따른 최적의 결합효율을 결정하기 위한 수치해석과 그 결과를 제시하였다.

II. 비대칭 GADC의 결합효율

비대칭 GADC와 같이 비대칭 격자로 구성된 방향성 결합기는 비대칭 특성과 전송 도파로의 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합효율이 증가하거나 감소한다. 이러한 변수들에 의존하는 비대칭 GADC가 그림 1에 자세하게 도시되어 있다.

그림 1에 도시된 비대칭 GADC는 $n_s = 3.0$ 의 굴절률을 갖는 기판 위에 두께 $t_{dn} = 0.3 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_f = 3.5$

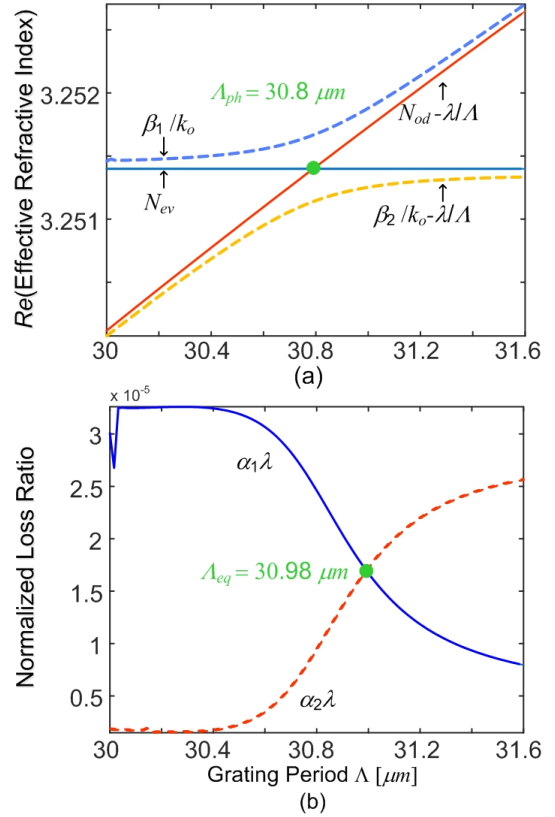


그림 2. TE 모드에 대한 비대칭 GADC의 모드 특성: (a) 격자 주기에 따른 누설파 (점선)와 표면파 (실선)에 대한 분산 곡선, (b) 정확한 모드들의 정규화된 손실비율.

Fig. 2. Modal characteristics of asymmetric GADC for TE modes: (a) dispersion curves of rigorous leaky-wave (dashed-lines) and surface-wave (solid-lines), and (b) normalized loss ratio of two rigorous modes.

인 하향 도파로, 두께 $t_f = 0.55 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_f = 3.2$ 인 spacer 층, 두께 $t_{up} = 0.9 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_{up} = 3.3$ 인 상향 도파로 형태의 구조로 설계하였다. 또한 비대칭 격자의 높이는 $t_g = 0.1 \mu\text{m}$, 비대칭 변수들은 $d_{(1,2)}/\Lambda = 0.15$, $d_3/\Lambda = 0.1$ 와 같이 선택하였다. 그때, 동작파장 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 에서 동작하는 비대칭 GADC의 분산특성을 분석하기 위하여 비대칭 격자 층을 아래와 같은 평균 굴절률로 대체할 수 있으며

$$n_p = \sqrt{n_{up}^2 \frac{(d_1 + d_3)}{\Lambda} + n_f^2 \left(1 - \frac{(d_1 + d_3)}{\Lambda}\right)} \quad (1)$$

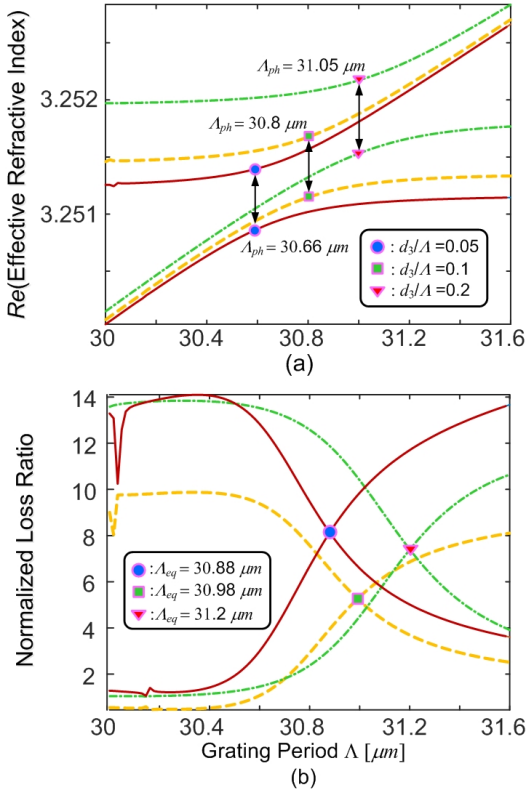


그림 3. Duty cycle에 따른 비대칭 GADC의 모드 특성: (a) 격자 주기에 따른 누설파에 대한 분산 곡선, (b) 정확한 모드들의 정규화된 손실비율.
 Fig. 3. Modal characteristics of asymmetric GADC along duty cycle: (a) dispersion curves of rigorous leaky-wave, and (b) normalized loss ratio of two rigorous modes.

그 전송구조는 $k_{z,sw} = \beta_{sw} + i\alpha_{sw}$ 의 전파상수에 의존하여 변하는 표면파(surface wave) 형태의 모드를 전송한다. 그러므로 주기성이 없는 전송구조에서는 오직 기본 모드만이 고려되며 고차원 모드들의 존재 가능성은 무시한다. 그러나 주기성이 도입되면 표면파 모드는 Floquet 모드들이 나타나는 형태로 변한다. 즉, 전파상수는 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$k_{zn} = \left(\beta + \frac{2n\pi}{\Lambda} \right) + i\alpha \quad (2)$$

여기서, n 은 n 번째 공간 고조파를 나타내며, Λ 는 격자 주기를 나타낸다. 그때, 이 식을 구성하는 0번째 공간 고조파의 전파상수 $\beta + i\alpha$ 를 결정하기 위하여 아래와 같은 L-MTLT의 횡방향 공진조건 (Transverse resonance

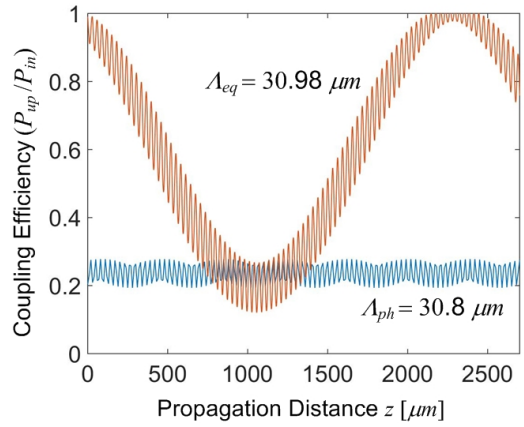


그림 4. 비대칭 GADC에서 전파하는 중첩모드들의 결합효율.
 Fig. 4. Coupling efficiency of supermodes propagating through asymmetric GADC.

condition)^[6]을 적용하여 비대칭 GADC에서 전파하는 정확한 모드들의 전파상수와 그 감쇄상수를 결정할 수 있다.

$$\left| \mathbf{Y}_{up}(k_{zn}) + \mathbf{Y}_{dn}(k_{zn}) \right| = 0 \quad (3)$$

여기서, \mathbf{Y}_{up} 과 \mathbf{Y}_{dn} 은 그림 1을 등가화한 전송선로의 임의의 위치에서 위와 아래로 들여다본 입력 어드미턴스 (Admittance) 행렬을 의미한다.

결국, 식 (3)의 횡방향 공진조건으로부터 미지수인 고유치 k_{zn} 을 구할 수 있으며, 이 값을 이용하여 비대칭 GADC 내에서 전파하는 정확한 모드들의 그 분산특성뿐만 아니라 전파하는 중첩모드 (supermodes)들의 분산특성을 평가할 수 있다. 이에 대한 수치해석 결과가 그림 2에 잘 나타나 있다.

그림 2(a)에서 보듯이, 격자 층이 식 (1)의 평균 굴절률을 갖는 균일 층으로 대체된 경우 비대칭 GADC의 결합 영역에서는 두 개의 표면파 (Surface waves) 모드 N_{od} , N_{ev} 가 발생하며, 이 모드들은 위상정합 조건 (Phase-matching condition: PMC)을 나타내는 임의의 한 점에서 서로 일치하는 특성을 나타낸다. 본 논문에서 제안한 구조에서 위상정합 조건은 격자주기 $A_{ph} = 30.8 \mu\text{m}$ 에서 발생하였다. 이 조건은 광소자 특성 해석에서 널리 사용되고 있는 CMT에서 광 방향성 결합기의 최적 전력전송을 위한 조건으로 지금까지 널리 사용되어 왔다.

그때 주기적인 격자 층으로 구성된 비대칭 GADC의

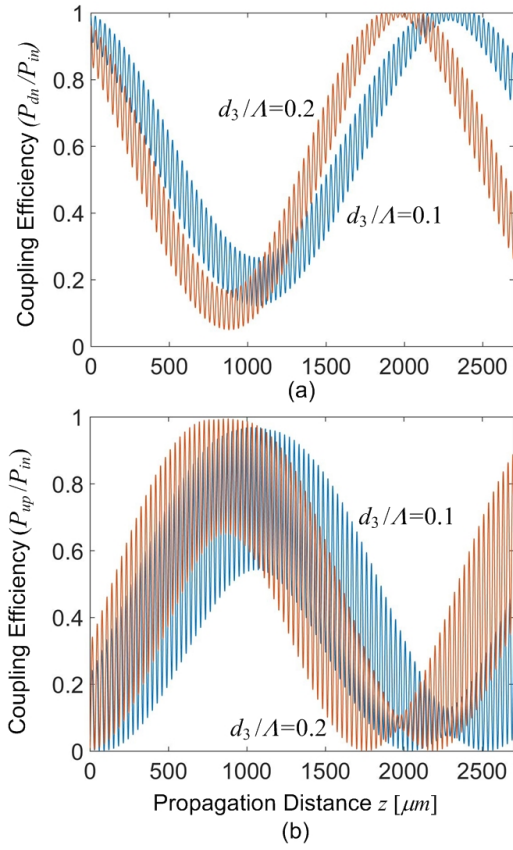


그림 5. Λ_{eq} 에서 비대칭 GADC에서 전파하는 중첩모드들의 결합효율.

Fig. 5. Coupling efficiency of supermodes propagating through asymmetric GADC at Λ_{eq} .

경우, 근사적인 두 개의 표면과 모드들은 전파상수 β_1, β_2 인 누설파 (Leaky waves) 형태의 중첩모드들로 변환된다. 그림 2(a)의 점선에서 보듯이, 두 모드들은 PMC를 만족하는 격자주기에서 모드들 사이의 간격이 최소가 되었으며 (즉, 가장 유사한 전파특성을 나타냈으며) 이 최소간격 조건 (Minimum gap condition: MGC)에서 또한 최적 전력전송이 가능한 것으로 보고되어 왔다. 또한 최적 전력전송이 가능한 다른 조건은 전파하는 누설파 중첩모드들의 누설 손실 (α)이 서로 같은 손실 등가조건 (Loss equality condition: LEC)이다. 그림 2(b)에서 보듯이, 설계된 비대칭 GADC는 격자주기 $\Lambda_{eq} = 30.98 \mu\text{m}$ 에서 두 누설파 모드들의 누설손실이 일치하였다.

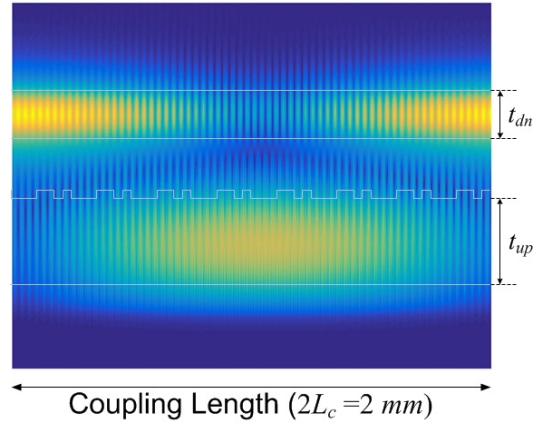


그림 6. 비대칭 GADC 내에서 전파하는 전송 모드의 필드분포.
Fig. 6. Field distribution of guided mode propagating through asymmetric GADC.

다음으로, 비대칭 격자구조를 구성하는 비대칭 변수 d_3/Λ 에 따른 분산특성을 분석하였다. 그림 3에서 보듯이, d_3/Λ 가 증가함에 따라, 즉 비대칭 격자구조가 대칭 구조에 접근함에 따라 최적 전력전송을 위한 3가지 조건을 만족하는 격자주기가 점점 증가하였다. $d_3/\Lambda = 0.2$ 인 경우 $\Lambda_{ph} = 31.05 \mu\text{m}$, $\Lambda_{eq} = 31.2 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

결국, 위에서 제시한 3가지 조건에서 발생하는 비대칭 GADC의 전력전송 특성을 분석하기 위하여 L-MTLT에 기초한 결합효율을 유도하였다. 그림 1에서 보듯이, $z=0$ 에서 입력된 광신호는 임의의 결합길이 $z=L_c$ 를 진행한 후에 상향 또는 하향 도파로를 통하여 출력되며, L-MTLT에 기초한 그 출력 모드 전입^[7]은

$$\begin{aligned} V_{out}(L_c) &= (A_1 B_1 e^{ik_1 L_c} + A_2 B_2 e^{ik_2 L_c}) V_{in}(0) \\ &= T_f V_{in}(0) \end{aligned} \quad (4)$$

와 같다. 여기서, 입/출력 변압계수 (Transformer Coefficient) $A_{(1,2)}$, $B_{(1,2)}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{(1,2)} &= \int \left\{ e_{in}(x) \sum_m k_{zm,(1,2)} e_{jm}^{(1,2)}(x) \right\} dS \\ B_{(1,2)} &= \int \left\{ e_{out}^*(x) \sum_n e_{jn}^{(1,2)}(x) e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} L_c} \right\} dS \end{aligned} \quad (5)$$

결국, TE 모드에 대한 결합효율 (Coupling efficiency) 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_{TE} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\text{Re}(k_{z,out})}{\text{Re}(k_{z,in})} |T_f|^2 \quad (6)$$

그림 2에서 고찰한 비대칭 GADC의 최적 전력전송을 위한 조건을 분석하기 위하여 다음 장에서 식 (6)에 정의된 결합효율을 분석하였다.

III. 수치해석 및 고찰

본 논문에서 제안한 비대칭 GADC의 결합특성에 대한 타당성과 정확성을 보이기 위하여 정확한 L-MTLT에 기초한 결합효율을 분석하였다.

먼저, 그림 2(a)에서 언급한 최소간격 조건과 같은 특성을 나타내는 위상정합 조건 (PMC) A_{ph} 에서 발생하는 결합효율을 평가하고, 그림 2(b)에서 설명한 손실 등가조건 (LEC) A_{eq} 에서 발생하는 결합효율과 비교 검토하였다. 그림 4에서 보듯이, $A_{ph} = 30.8 \mu\text{m}$ 일 때 발생하는 결합효율은 전파거리 z 에 따른 광신호의 결합특성이 나타나지 않았다. 이는 대칭/비대칭 모드로 구성되는 중첩모드가 PMC에서는 생성되지 않아 모드들 사이의 결합이 발생하지 않았기 때문이다. 반면에, $A_{eq} = 30.98 \mu\text{m}$ 인 LEC에서는 대칭/비대칭 형태의 중첩모드가 잘 형성되어 전파거리에 따른 결합효율이 잘 발생하였다. 그때 결합길이 (Coupling length)는 $L_c \approx 1100 \mu\text{m}$ 에서 나타남을 보였다. 그러므로 비대칭 GADC 구조에서 최적 전력전송 특성을 얻기 위해서는 기존의 전형적인 결합조건들 (PMC, MGC)을 적용하기 보다는 본 논문에서 추가로 정의한 LEC를 사용하여 결합효율을 분석하고 그에 기초하여 비대칭 GADC를 설계, 제작하여야 한다.

다음으로, 비대칭 격자구조를 구성하는 비대칭 변수 d_3/Λ 에 따른 결합효율을 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, d_3/Λ 가 증가함에 따라, 즉 비대칭 격자구조가 대칭 구조에 접근함에 따라 결합효율이 향상되었으며, 결합길이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. $d_3/\Lambda = 0.1$ 인 경우 하향 도파로에서 상향 도파로로 평균 80%가 전달되었으며, $d_3/\Lambda = 0.2$ 인 경우에는 평균 95%가 결합되어 전달되었다. 또한, 결합길이는 $L_c \approx 1100 \mu\text{m}$ 에서 $L_c \approx 1000 \mu\text{m}$ 로 줄어들었으며, 그림에서 보듯이 비대칭 격자구조에 기인한 리플 비트 패턴은 변화가 거의 없

었다.

마지막으로, $d_3/\Lambda = 0.2$ 인 경우 비대칭 GADC에서 전파하는 전송모드 (guided mode)의 필드분포를 분석하였다. 그림 6에서 보듯이, 그림 5에 도시한 결합효율의 특성이 하/상향 도파로에 명확하게 나타나 있음을 알 수 있으며, 리플 비트 패턴에 의한 물결모양의 무늬가 선명하게 표현되어 있는 것을 볼 수 있다.

결국, 이와 같은 수치 해석적 사실로부터 다음과 같은 결론을 이끌 수 있다. 비대칭 GADC는 전형적으로 최적 전력전송 조건으로 사용되는 MGC이나 PMC이 아닌 LEC에서 분석하여 설계해야 한다는 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 비대칭 격자 구조형 방향성 결합기 (GADC)를 제안하였다. 제안한 비대칭 GADC의 전파특성과 최대 결합효율을 갖는 최적 전력전송 특성을 정확하게 분석하기 위하여 정확한 중방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)에 기초한 결합효율을 정의하고 이용하였다.

분석결과, 비대칭 GADC에서 최적 전력전송은 표면파 모드들의 PMC 또는 정확한 누설파 모드들의 MGC가 아닌 전파하는 누설파 중첩모드들의 누설손실이 서로 같은 LEC에서 발생함을 보였다.

결국, 비대칭 격자 층으로 구성된 비대칭 GADC의 전파 및 결합특성은 누설손실에 의해 좌우되며, 누설손실이 서로 같은 모드들은 가장 좋은 결합효율과 가장 짧은 결합길이를 갖는 것으로 확인되었다.

References

- [1] H. F. Taylor, "Frequency-selective coupling in parallel dielectric waveguides," *Opt. Commun.*, vol. 8, no. 4, pp. 412-425, Aug. 1973.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(73\)90233-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(73)90233-2)
- [2] G. W. Chern and L. A. Wang, "Analysis and design of almost-periodic vertical-grating-assisted codirectional coupler filters with nonuniform duty ratios," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 25, pp. 4926-4637, Sept. 2000.

DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.39.004629>

- [3] R. C. Alferness and P. S. Cross, "Filter characteristics of codirectional coupled waveguides with weighted coupling," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, pp. 843-847, Nov. 1978.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JQE.1978.1069707>
- [4] B. E. Little, C. Wu, and W.-P. Huang, "Synthesis of codirectional couplers with ultralow sidelobes and minimum bandwidth," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 11, pp. 1259-1261, June 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.20.001259>
- [5] W. P. Huang and J. Hong, "A transfer matrix approach based on local normal modes for coupled waveguides with periodic perturbations," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 1367-1375, Oct. 1992.
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.40.004476>
- [6] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," *IEICE Trans. Electronics*, Vol. E88-C, No. 2, pp. 270~274, 2005.
- [7] K. C. Ho, "Diffraction Analysis of Multi-layered Grating Structures using Rigorous Equivalent Transmission-Line Theory," *The J. of IIBC*, Vol. 15, No. 1, pp. 261-267, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.1.261>
- [8] J. O. Park and W. K. Jang, "Optical metrology for resonant surface acoustic wave in RF device," *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 11, pp. 3435-3440, 2010.

저자 소개

호 광 춘(중신회원)

- 제 10권 1호 참조
 - 현 한성대학교 전자정보공학과 교수
- <주관심분야: Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices, Optical Biosensors and Bioelectronics>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.