

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.1.77>

JIIBC 2013-1-11

주기가 다른 격자들로 구성된 DFB 필터의 구현

Implementation of Distributed Feedback Filters using Cascaded Gratings with Different Period

호광춘*

Kwang-Chun Ho

요약 주기가 다른 격자들로 구성된 평면 DFB 도파로의 필터 특성들을 등가 전송선로 망을 사용하여 구현하였다. 대역 필터 특성과 공진 특성을 정확하게 분석하기 위하여 Floquet 이론과 Babinet 원리에 기초한 종방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)을 제시하였다. 수치해석 결과, 본 논문에서 제시한 해석법은 주기가 다른 격자들로 구성된 DFB 도파로의 필터 특성들을 분석하기 위한 간단한 수치 해석적 알고리즘을 제공하였으며, DFB 필터의 대역폭과 사이드 로브의 억압특성 각 영역에서의 격자개수와 격자 종횡비 (aspect ratio)에 민감하게 의존함을 보였다.

Abstract The filtering characteristics of planar distributed feedback (DFB) waveguides composed by gratings with different period are solved using equivalent transmission-line network. To analyze explicitly its band-pass and resonance properties, a longitudinal modal transmission-line theory (L-MTLT) based on Floquet's theorem and Babinet's principle is newly developed. The numerical results reveal that this approach offers a simple and analytic algorithm to analyze the filtering characteristics of cascaded DFB structure with different period, and the bandwidth and side-lobe suppression of cascaded DFB filter are sensitively dependent on the variation of aspect ratio and the number of grating at each region.

Key Words : Equivalent Transmission-Line Network, DFB Filter, Floquet-Babinet's Principle

1. 서론

협대역 (narrow band) 광 필터는 파장 분할 다중화 (wavelength division multiplexer) 방식에 기초한 광통신용 전송망에서 필수적인 소자이다. 그림 1에서 보듯이, 본 논문에서 제시한 주기가 다른 격자들로 구성된 DFB 형태의 필터는 격자들에 이용하여 전 (forward), 후 (backward) 방향으로 전파하는 모드들을 선택적으로 결합시킬 수 있으며, 이를 이용하여 광통신용 전송망에서

필요로 하는 다양한 특성들의 대역통과 (band-pass) 필터를 구현할 수 있다. 즉, 같은 형태의 격자로 구성된 전형적인 대역필터에 비하여 채널 용량을 증가시킬 수 있는 매우 좁은 대역폭의 협대역 필터를 구현할 수 있다. 더욱이, 강한 반사특성으로 인하여 필터의 차단 대역폭이 소자의 길이에 민감하게 변하지 않으므로 소자를 제작할 때 발생하는 허용오차 (tolerance)를 줄일 수 있다. 일반적으로, DFB 필터의 설계특성은 실험결과와 잘 일치하는 결합모드이론 (Coupled Mode Theory: CMT)을

*중신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2012년 12월 31일, 수정완료 2013년 1월 25일
게재확정일자 2013년 2월 8일

Received: 31 December 2012 / Revised: 25 January 2013 /
Accepted: 8 February 2013

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr
Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

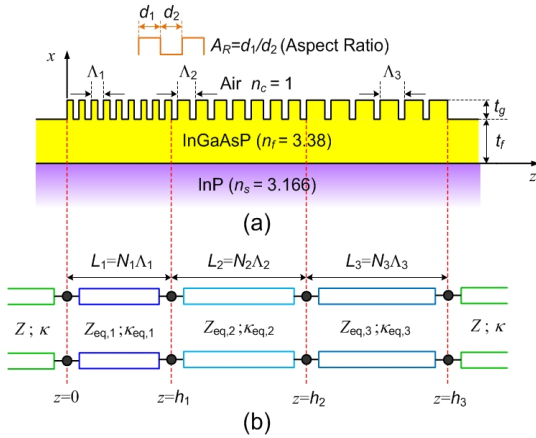


그림 1. (a) 주기가 다른 격자들로 구성된 DFB 필터의 기하학적 구조. (b) DFB 필터의 등가 전송선로 망.
Fig. 1. (a) Geometric configuration of DFB filter using gratings with different period. (b) Equivalent transmission-line network of DFB filter.

사용하여 모델링되어 왔다^[1, 2]. 비록, CMT가 다양한 전송구조를 분석하기 위하여 널리 사용되어 왔지만 본 논문에서 제안한 계단식 (cascaded) DFB 전송구조를 분석하기에는 복잡하고 많은 수학적 과정이 필요하다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 발생하는 대역통과 필터특성 분석하기 위하여 Floquet 이론^[3]과 Babinet 원리^[4]에 기초한 종방향 모드 전송선로 이론 (Longitudinal Modal Transmission Line Theory: L-MTLT)을 사용하여 계단식 DFB의 필터특성을 간단하고 정확하게 해석하였다. 더욱이, 단일 TE_0 모드가 계단식 DFB 필터구조에서 어떻게 진행되는지에 대한 전파특성을 모드 전압분포를 사용하여 정확하게 분석하였다.

II. DFB 필터의 전송선로 이론

1. 등가 전파상수

본 논문에서 제안한 주기가 다른 격자들로 구성된 DFB 필터구조가 그림 1(a)에 자세하게 도시되어 있다. 이 소자는 주기 (period) Λ 가 서로 다른 3개의 DFB 전송구조를 직렬로 연결하여 구성하였다. 각 단을 구성하는 격자구조의 길이 $L_{(1,2,3)}$ 는 주기 $\Lambda_{(1,2,3)}$ 에 격자의 개수 $N_{(1,2,3)}$ 를 곱하여 구성하였으며, 기판 층은 굴절률이

$n_s = 3.166$ 인 InP 로, 전송 층은 굴절률이 $n_f = 3.38$ 인 무손실 InGaAsP 로 형성하였다. 또한, 단일 TE_0 모드가 전파하도록 필름의 두께는 $t_f = 0.5 \mu\text{m}$ 로, 격자구조의 두께는 $t_g = 0.2 \mu\text{m}$ 와 같이 선정하였다.

L-MTLT에 기초한 실질적인 설계 변수들을 결정하기 위하여 먼저 그림 1(b)에 제시한 등가 전송선로 망의 모드변수인 등가 전파상수 $\kappa_{eq,(1,2,3)}$ 를 결정해야 한다. Floquet 이론과 Babinet 원리에 기초한 단위 셀 (unit-cell) 해석법으로 정의된 등가 전파상수는 아래와 같다^[5].

$$\frac{\kappa_{eq}\Lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1}[\theta(\lambda)] \quad (1)$$

여기서, DFB 전송구조의 분산특성을 나타내는 변수인 $\theta(\lambda)$ 는

$$\theta(\lambda) = \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1 n_2} \right) \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \quad (2)$$

와 같이 정의할 수 있다. 위의 식에서 $\kappa_{(1,2)} = k_o n_{(1,2)}$ 는 MTLT의 횡방향 공진조건 (Transverse Resonance Condition)^[6]으로부터 결정된 $d_1 + d_2$ 길이의 단위 셀(그림 1(a)의 삽입도 참조)에 대한 국부 전파상수들을 나타낸다. 결국, 식 (2)에 주어진 등가 전파상수를 이용하여 L_1, L_2, L_3 단으로 구성된 계단형 DFB 전송구조의 필터특성을 분석할 수 있다.

먼저, 동작파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 차단 대역특성을 나타내는 계단형 DFB 필터의 특성을 분석하기 위하여 L_1, L_2, L_3 단을 구성하는 각 DFB 영역들의 격자주기를 결정해야 한다. 그림 2에 격자주기 $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ 에 따른 각 DFB 영역의 반사전력 (reflected power)을 도시하였다. 그림에서 보듯이, 길이 L_1, L_2, L_3 인 DFB 영역은 각각 $\Lambda_1 = 0.7115, \Lambda_2 = 1.186, \Lambda_3 = 1.66$ 에서 TE_0 모드에 대한 반사전력이 최대값을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 그림 2(a)에서 보듯이, 격자 종횡비 (aspect ratio)가 $A_R = 0.3$ 인 경우 (점선으로 표시)의 반사전력이 $A_R = 0.5$ 인 경우 (실선으로 표시)보다 약 -8 dB 낮은 사이드 로브 (side-lobe) 억압 (suppression)특성을 나타내었다.

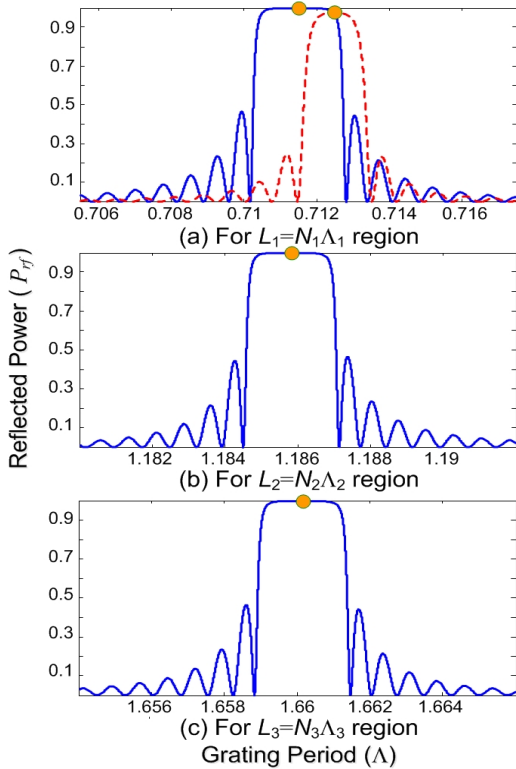


그림 2. 격자주기에 따른 반사전력의 변화. 여기서, 실선은 $A_R = 0.5$, 점선은 $A_R = 0.3$ 인 경우이다.

Fig. 2. Variation of the reflected power along grating period. Here, the solid-line is for $A_R = 0.5$, and the dashed-line is for $A_R = 0.3$.

2. 등가 특성 임피던스

$z = 0$ 에서 발생하는 계단형 DFB 필터의 반사전력을 수치해석 하기 위하여 그림 2(b)에 주어진 등가 전송선로 망의 특성 임피던스 (characteristic impedance) $Z_{eq,(1,2,3)}$ 를 결정해야 한다. 그림 2(b)의 전송선로 망에 Babinet 원리를 적용하면 open-circuit과 short-circuit에 대한 다음과 같은 입력 임피던스^[5]를 유도할 수 있다.

$$Z_{ob} = iZ_1 \frac{Z_2 - Z_1 \tan\left(\frac{\kappa_1 d_1}{2}\right) \tan\left(\frac{\kappa_2 d_2}{2}\right)}{Z_1 \tan\left(\frac{\kappa_2 d_2}{2}\right) + Z_2 \tan\left(\frac{\kappa_1 d_1}{2}\right)}, \quad (3)$$

$$Z_{sb} = -iZ_1 \frac{Z_1 \tan\left(\frac{\kappa_1 d_1}{2}\right) + Z_2 \tan\left(\frac{\kappa_2 d_2}{2}\right)}{Z_1 - Z_2 \tan\left(\frac{\kappa_1 d_1}{2}\right) \tan\left(\frac{\kappa_2 d_2}{2}\right)}$$

여기서, $Z_{(1,2)}$ 는 단위 셀에서 길이가 d_1, d_2 인 부분의 국부 임피던스를 나타낸다. 결국, 각 DFB 영역의 단위 셀에 대한 등가 특성 임피던스는

$$Z_{eq} = \sqrt{Z_{ob} Z_{sb}} \quad (4)$$

와 같이 TE₀ 모드에 대하여 정의 할 수 있다. 결국, 식 (2)과 식 (4)로 구성된 그림 2(b)의 등가 전송선로 망을 이용하여 계단형 DFB 필터의 반사전력을 쉽고 정확하게 분석할 수 있다.

3. 모드 전압분포 및 반사전력

비록 일반적으로 널리 사용하는 근사적 해석법인 CMT가 L-MTLT와 같이 DFB 전송구조를 분석할 때 간결성과 해석적 유용성을 제공 하지만, 본 논문에서 제안한 계단형 DFB 필터에서 전파하는 모드들의 전파특성을 자세하게 분석하기에는 많은 어려움이 발생한다. 반면에 L-MTLT는 전파하는 전계와 자계를 유사화한 전형적인 전송선로 방정식에 의존하기 때문에 계단형 DFB 필터에서 전파하는 모드들의 전파특성을 쉽게 해석적으로 분석할 수 있다.

그림 1(b)에서 보듯이, DFB의 각 영역을 구성하는 등가 전송선로 망에서 z -축을 따라 전파하는 TE₀ 모드의 등가 전압은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$V_0(z) = V_{f,0} \left\{ e^{ikz} + \Gamma_0 e^{-ikz} \right\},$$

$$V_m(z) = V_{f,m} \left\{ e^{ik_{eq,m}(z-h_{m-1})} + \Gamma_m e^{2ik_{eq,m}L_m} e^{-ik_{eq,m}(z-h_{m-1})} \right\}, \quad (5)$$

$$V_4(z) = V_{f,4} e^{ik(z-h_3)}$$

여기서, $V_{f,m}$ 는 $z = h_m$ 에서 각 전송선로에 입사되는 전압크기를 나타내며, Γ_m 은 $z = h_m$ 에서 전송선로의 오른쪽으로 들여다 본 반사계수를 나타낸다. 그러므로, 길이 L_1, L_2, L_3 를 갖는 각 전송선로들의 경계면에서 발생하는 전파 모드전압들의 연속조건을 적용하면 다음과 같은 모드변수들 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

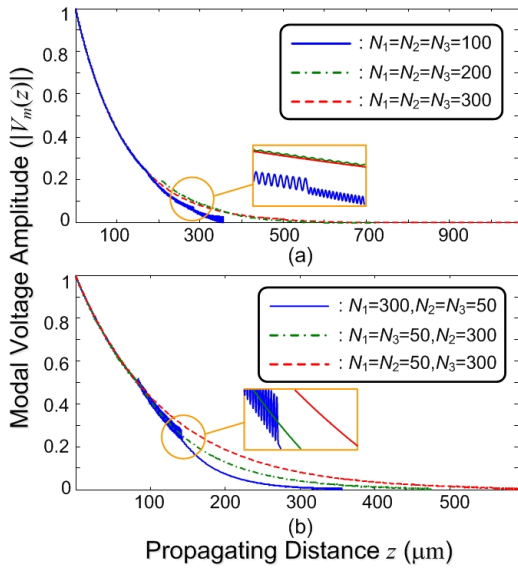


그림 3. 전파거리에 따른 단일 모드의 모드 전압분포.
Fig. 3. Modal voltage distribution of single mode along propagating distance.

$$V_{f,0} = \frac{1 + \Gamma_1 e^{2i\kappa_{eq,1}L_1}}{1 + \Gamma_0},$$

$$V_{f,1} = 1,$$

$$V_{f,m} = \frac{V_{f,m-1} e^{2i\kappa_{eq,m-1}L_{m-1}} (1 + \Gamma_{m-1})}{1 + \Gamma_m e^{2i\kappa_{eq,m}L_m}} \quad (6)$$

결국, 식 (5)와 (6)으로부터 $z=0$ 에서 발생하는 계단형 DFB 필터의 반사전력 (reflected power)을 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$P_{rf} = |\Gamma_0|^2 P_m \quad (7)$$

여기서, Γ_0 는 $z=0$ 에서 오른쪽으로 등가 전송선로 망을 들여다본 반사계수이며, 그림 1(b)에 주어진 각 전송선로의 특성 임피던스 $Z_{eq,(1,2,3)}$ 를 사용하여 전형적인 전송선로 해석법으로부터 결정할 수 있다.

식 (5)에 의존하여 계단형 DFB 필터 내에서 전파하는 TE₀ 모드의 특성을 분석하기 위하여, 전파거리에 따라 진행되는 모드 전압크기를 그림 3에 도시하였다. 그림에서 보듯이, 모드전압은 전파거리에 따라 전파상수

$\kappa_{eq,(1,2,3)}$ 에 의존하여 지수 함수적으로 감소하였다. 더욱이, 격자개수가 $N_1 = N_2 = N_3 = 100$ 인 경우와 $N_1 = 300, N_2 = N_3 = 50$ 인 경우 (그림 3의 확대된 삽입도에서 보듯이) 모드전압은 전파거리에 따라 리플 비트 (ripple beat) 패턴을 나타냈으며, 다른 주기를 갖는 DFB 전송구조들 사이의 경계면에서 모드 전압의 크기가 현저하게 변화됨을 보였다. 이와 같이 현상으로 인하여 전송선로는 경계면에서 매우 높은 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)값을 갖으며, 결국 계단형 DFB 필터는 좋지 않은 대역필터 특성을 보일 것으로 판단된다.

III. 수치해석 및 고찰

2절에서 고려한 등가 전파상수와 등가 특성 임피던스에 기초한 등가 전송선로를 사용하여 계단형 DFB 필터의 반사전력을 수치해석 하였다. 즉, 그림 1(b)에서 보듯이 $z=0$ 에서 오른쪽으로 들여다 본 TE₀ 모드에 대한 식 (7)의 반사전력을 분석하였다.

먼저, 계단형 DFB 필터를 구성하는 각 DFB 전송구조들의 격자개수가 서로 같은 경우 ($N_1 = N_2 = N_3$)에 발생하는 반사전력에 대한 대역통과 필터 특성을 분석하였다. 그림 4에서 보듯이, 각 DFB 전송구조들의 격자개수가 100, 200, 300으로 증가하면서 격자 종횡비가 $A_R = 0.5$ 인 경우 (실선으로 표시) 필터의 대역폭 (bandwidth)이 각각 6 nm, 6 nm, 5 nm로 감소하였으며, $A_R = 0.3$ 인 경우 (점선으로 표시)에는 각각 4 nm, 3.4 nm, 3 nm로 $A_R = 0.5$ 인 경우보다 협대역 특성을 나타내었다.

그러나, 2절의 모드 전압분포에서 언급하였듯이 $N_1 = N_2 = N_3 = 100$ 인 경우 각 DFB 전송구조 사이의 부정합 (mismatching)으로 인한 리플 비트 패턴의 발생과 매우 높은 VSWR에 기인하여 좋지 않은 필터특성을 나타내었다. 또한, $A_R = 0.3$ 인 경우 (점선으로 표시)의 대역특성이 $A_R = 0.5$ 인 경우 (실선으로 표시)보다 $N_1 = N_2 = N_3 = 200, 300$ 에서 각각 약 -3, -2 dB, 낮은 사이드 로브 억압특성을 나타내었다. 결국, 계단형 DFB 필터특성은 대역폭이 3.4 nm이고 사이드 로브가 -3 dB 이하에서 발생하는 그림 4(b)의 경우가 가장 좋은 특성을 갖는 것으로 분석되었다.

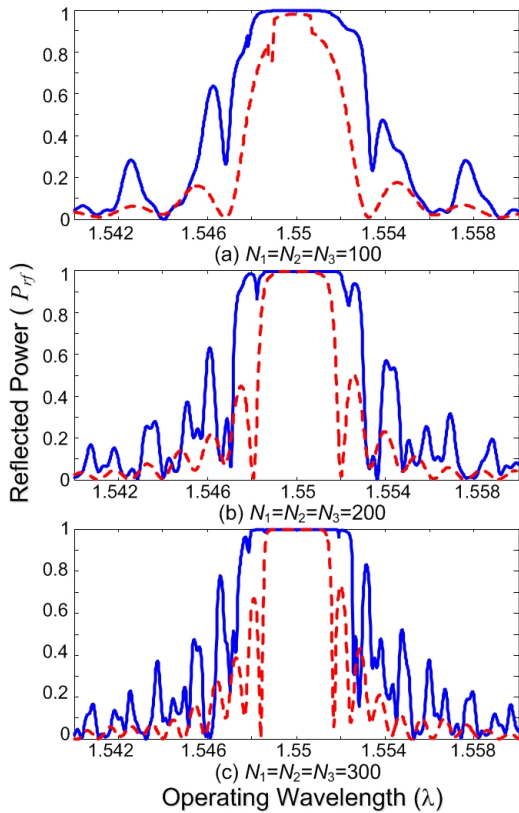


그림 4. 동작파장에 따른 반사전력의 변화. 여기서, 실선은 $A_R = 0.5$, 점선은 $A_R = 0.3$ 인 경우이다.
 Fig. 4. Variation of the reflected power along with operating wavelength. Here, the solid-line is for $A_R = 0.5$, and the dashed-line is for $A_R = 0.3$.

다음으로, 계단형 DFB 필터의 성능을 향상시키기 위하여, 즉 소자를 소형화하고 사이드 로브를 감소시키기 위하여 각 DFB 전송구조들의 격자개수를 다르게 선택하여 대역통과 필터 특성을 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, $N_1 = 300, N_2 = N_3 = 50$ 인 경우 그림 4(a)와 같은 이유로 인하여 좋지 않은 필터특성을 나타내었으며, $A_R = 0.5$ 인 경우 (실선으로 표시) 필터특성이 각 DFB 전송구조들의 격자개수가 서로 같은 경우에 비하여 향상된 특성을 보이지 않았다. 더욱이, 그림 4의 경우보다 사이드 로브는 조금 높게 나타났다.

또한, $A_R = 0.3$ 인 경우 (점선으로 표시)에 대역폭은 $N_1 = N_3 = 50, N_2 = 300$ 와 $N_1 = N_2 = 50, N_3 = 300$ 에서 각각 2.8 nm , 3 nm 로 그림 4의 경우와 유사하였으며,

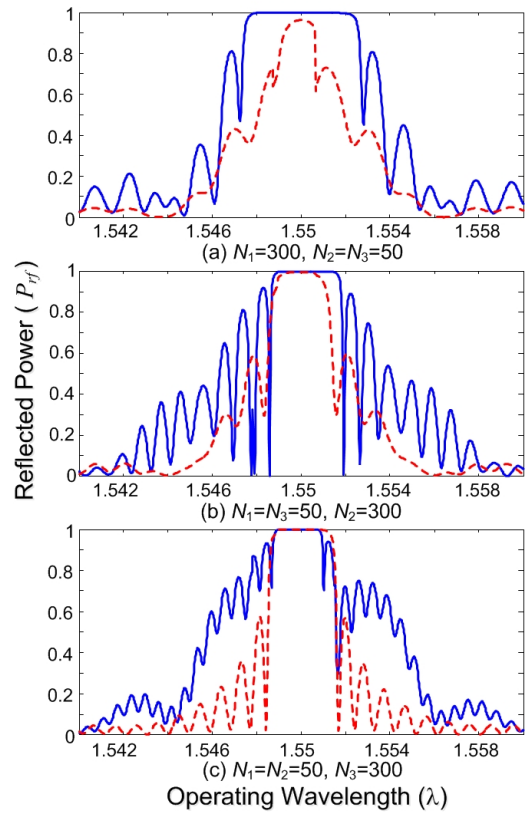


그림 5. 동작파장에 따른 반사전력의 변화. 여기서, 실선은 $A_R = 0.5$, 점선은 $A_R = 0.3$ 인 경우이다.
 Fig. 5. Variation of the reflected power along with operating wavelength. Here, the solid-line is for $A_R = 0.5$, and the dashed-line is for $A_R = 0.3$.

사이드 로브도 비슷하게 -3 dB 이하에서 발생하였다. 그러므로, 격자개수를 다르게 선택하였을 경우에 계단형 DFB 필터의 성능 향상은 발생하지 않았다.

그러나, 그림 3에서 보듯이 각 DFB 전송구조들의 격자개수를 다르게 선택하였을 경우 (그림 3(b)의 경우)에 격자개수를 같게 선택하였을 경우 (그림 3(a)의 경우)보다 계단형 DFB 필터의 평균 크기가 약 $33\% \sim 45\%$ 정도 소형화 되는 것을 알 수 있었다.

IV. 결론

중방향 모드 전송선로 이론(L-MTLT)을 사용하여 동작파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 협대역 필터 특성과 사이드 로

브 억압 특성을 갖는 계단형 DFB 필터의 설계과정을 분석하였다. 수치해석하여 분석한 결과, 계단형 DFB 필터를 구성하는 각 DFB 전송구조들의 격자개수가 서로 다른 구조가 격자개수가 서로 같은 구조 ($N_1 = N_2 = N_3$)보다 소자를 소형화할 수 있음을 보였다. 더욱이, $N_1 = N_2 = 50, N_3 = 300$ 구조에서 대역폭은 3 nm로 협대역 특성을 나타냈으며, 사이드 로브는 -3 dB 이하로 잘 억압되어 나타났다.

결국, 본 논문에서 제시한 Floquet 이론과 Babinet 원리에 기초한 종방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)은 주기가 다른 격자들로 구성된 계단형 DFB 필터의 설계 특성을 분석하기 위한 매우 쉽고 유용한 해석법으로 사용될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers," J. App. Phys., Vol. 43, pp. 2327~2335, May 1972.
- [2] H. A. Haus and Y. Lai, "Theory of Cascaded Quarter Wave Shifted Distributed Feedback Resonators," IEEE J. Quantum Electron. Vol. 28, pp. 205~213, 1992.
- [3] W. L. Weeks, Electromagnetic Theory for Engineering Applications, pp. 167~173, John Wiley & Sons, Inc, 1963.
- [4] J. A. Kong, Electromagnetic Wave Theory, pp. 373~382, John Wiley & Sons, Inc, 1990.
- [5] J. H. Kim, K. C. Ho, Y. K. Kim, H. Y. Lee, H. D. Yoon, "A Novel Approach of Planar DFB Guiding Structures for Optical Communication," SK Telecom. Review Vol. 9, No. 4, pp. 662~675, 1999.
- [6] K. C. Ho, "Power Splitting of Plasmonic Directional Couplers with Nano-scale Three Channels," The J. of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, Vol. 11, No. 3, pp. 47~52, 2011.
- [7] 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.
- [8] J. Lim, J. Koo, J. Lee, S. M. Han, and D. Ahn, "An Efficient Design and Parameteric Study on the Transmission Lines with Substrate Integrated Artificial Dielectric," The J. of Korean Institute of Information Technology, Vol. 8, pp. 53~59, 2010.

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구장려금 지원과제입니다.

저자 소개

호 광 춘(중신회원)

- 제 10권 1호 참조
- 현 한성대학교 정보통신공학과 교수

<주관심분야: Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices>