

광섬유와 격자구조 도파로 결합기 설계를 위한 결합 모드 이론 분석

허형준* · 김상인*

Analysis of Coupled Mode Theory for Design of Coupler Between Optical Fiber And Grating Assisted Waveguide

Hyung-Jun Heo* · Sang-In Kim*

요 약

저밀도 파장분할다중화 기술을 광 집적 소자에 효율적으로 활용하기 위하여 광섬유와 평면기판 내 광 도파로 사이의 파장 선택적 광 결합기 구조가 효율적인 수단으로 고려될 수 있다. 본 논문에서는 공기 도랑 격자를 지닌 실리콘 도파로와 단일 모드 광섬유 간 결합을 고려하였다. 격자의 깊이에 따른 결합 효율의 경향성과 그 한계점을 조사하였다. 이를 위해 결합 모드 이론에 기반을 둔 모델링을 통하여 설계된 결합기 구조의 결합효율을 예측하고, 유한요소법을 이용한 시뮬레이션 결과와 정량적으로 비교 분석 하였다.

ABSTRACT

In order to effectively utilize the Coarse Wavelength Division Multiplexing(CWDM) technology in optical integrated devices, a design of a wavelength selective coupler structure between an optical fiber and an optical waveguide in a flat substrate is can be considered. In this paper, we consider the coupling between a silicon waveguide with an air trench and a single mode fiber. We investigated the tendency of coupling efficiency and its limitations according to the grating depth. For this purpose, the coupling efficiency of coupler structure designed through modeling based on coupled mode theory is predicted and quantitatively compared with simulation results using finite element method.

키워드

CWDM, Optical Communications, Coupler, Wavelength Selective, Coupled Mode Theory
저밀도 파장 분할 다중화 기술, 광통신, 결합기, 파장 선택적, 결합 모드 이론

I. 서 론

저밀도 파장다중화 기술(Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM)은 단일 광섬유에 대한 통신 용량을 넓히기 위한 방안으로 광통신 시스템에서 널리 활용 되고 있다. CWDM을 활용한 광섬유를 기반으로

하여 전송로, 센서, 변조기 등의 응용 분야[1-2]를 광 집적회로를 결합하여 활용하고자 하는 요구가 있다. 그러나 광섬유와 광 집적회로의 도파모드 간 불일치가 매우 크기 때문에 효율적인 결합에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 BUTT 결합기[3], Grating 결합기[4-5] 등에 대한 연구가 있었다. 하지

* 아주대학교 전자공학과 (bluesky525@ajou.ac.kr)

** 교신저자 : 아주대학교 전자공학과

• 접수 일 : 2017. 06. 12

• 수정완료일 : 2017. 07. 13

• 게재확정일 : 2017. 08. 01

• Received : Jun 12, 2017, Revised : July 13, 2017, Accepted : Aug 01, 2017

• Corresponding Author : Sang-In Kim

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,

Email : sangin@ajou.ac.kr

만 이러한 결합기는 CWDM에서 파장을 분할하기 위한 디멀티플렉서 구조가 추가로 요구 된다[6]. 이에 반해, 격자를 갖는 비대칭 도파로 구조를 활용할 경우 파장 선택적 특성과 높은 결합 효율을 얻을 수 있기 때문에 좋은 해결책이 될 수 있다[7]. 특히, 역방향성 결합기의 경우 격자 길이의 변화가 공진 정합 조건에 영향을 미치지 않아 두 도파로의 격자길이에 대한 공진 허용치가 높다는 점과 짧은 격자 주기로 인해 결합 효율의 세부 조절이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 공기 도랑 격자구조를 갖는 실리콘 도파로와 연마된 광섬유를 이용하여 파장 선택적 역방향성 결합기를 설계하였다.

격자를 갖는 비대칭 도파로 구조는 결합 모드 이론(Coupled Mode Theory, CMT)을 이용하여 간단한 수식으로 모델링할 수 있다. 이는 결합 특성을 효율적으로 분석하고 예측하는 방법으로 활용 된다[8-9]. 제안한 설계 구조가 짧은 길이에서 높은 결합 효율을 얻도록 결합 계수를 키우는 방법으로 두 가지 관점에서 살펴보았다. 첫 번째는 두 모드 간에 중첩 적분을 키우는 것이고 두 번째는 깊고 높은 굴절률 차이를 갖는 격자를 구성하는 방안이다. 광섬유와 실리콘 도파로의 높은 비대칭성 때문에 모드의 중첩 적분을 높이는 것은 효과적이지 않다. 따라서 높은 굴절률 차이와 깊은 격자구조를 중첩적으로 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 통한 시뮬레이션을 진행하였다. 결과적으로 CMT 모델에 고려되지 않은 산란 효과로 인해 상당한 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 본 논문의 II장에서는 제안하는 구조의 설계과정에 대해 알아보고 III장에서는 격자 깊이와 격자 길이에 따른 CMT 결과와 FEM 결과를 비교함으로써 산란효과를 정량적으로 비교한다. 마지막 IV장은 결론으로 구성되어 있다.

II. 설 계

2.1 결합 모드 이론

결합 모드 이론(CMT)은 도파로 내의 주기적인 격자구조와 같은 부분적인 굴절률 변화가 있을 경우 도파 모드 간의 상호 작용을 통해 나타나는 모드 결합을 직관적으로 이해하고 구조에 대한 분석을 높이는 데 유용하게 활용된다.

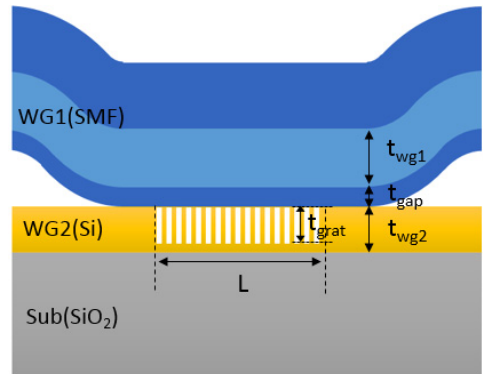


그림 1. 파장 선택적 광 결합기 구조 모식도.
Fig. 1 Schematics of wavelength selective optical coupler

그림 1은 설계 구조의 모식도를 보여준다. 격자가 새겨진 실리콘 도파로와 한쪽 측면이 연마된 단일 모드 광섬유를 근접하게 배치한 결합 구조이다. 이러한 구조에서 두 도파로의 상호작용은 크게 두 가지 과정으로 구분해 볼 수 있다. 먼저, 두 개의 도파로가 점접 가까워지는 구간으로 도파모드 간에 상호 작용으로 모드 천이가 발생하여 새로운 중첩 모드를 형성하게 된다. 큰 비대칭성을 갖는 두 도파모드의 경우에는 상호간의 큰 위상 차이를 갖기 때문에 새로운 중첩 모드는 각각의 도파모드와 매우 유사한 유효 굴절률과 전기장 분포를 갖는다. 다시 말해서 WG1, WG2 도파로로 들어오는 도파 모드의 유효 굴절률이 각각 n_{mode_1} , n_{mode_2} 이고 두 도파로가 근접함으로써 만들어진 새로운 중첩 모드의 유효 굴절률 n_{mode_a} , n_{mode_b} 이라면 $n_{mode_1} \approx n_{mode_a}$, $n_{mode_2} \approx n_{mode_b}$ 특성을 갖는다 [10]. 두 도파로가 가까이 근접하여도 서로의 모드 간 상호작용은 미비하다는 것을 의미한다. 다음으로 주기적인 격자구조가 있는 구간으로 두 중첩 모드 간의 위상 차이를 보상해 주는 격자조건을 만족할 경우 모드 간 에너지 이동이 발생 한다. 이때 나타나는 결합 효율을 결합 모드 방정식(coupled mode equation)

$$\begin{aligned} \frac{dA^+}{dz} &= -j\kappa_{aa}A^-e^{j2\Delta\beta_a z} - j\kappa_{ab}B^-e^{j(\Delta\beta_a+\Delta\beta_b)z} \\ \frac{dB^+}{dz} &= -j\kappa_{ab}A^-e^{j(\Delta\beta_a+\Delta\beta_b)z} - j\kappa_{bb}B^-e^{j2\Delta\beta_b z} \\ \frac{dA^-}{dz} &= j\kappa_{aa}^*A^+e^{-j2\Delta\beta_a z} + j\kappa_{ab}^*B^+e^{-j(\Delta\beta_a+\Delta\beta_b)z} \\ \frac{dB^-}{dz} &= j\kappa_{ab}^*A^+e^{-j(\Delta\beta_a+\Delta\beta_b)z} - j\kappa_{bb}^*B^+e^{-j2\Delta\beta_b z} \end{aligned} \quad (1)$$

을 통해 계산할 수 있다. 이때 A^\pm, B^\pm 는 각 모드의 크기성분을 나타내고 첨자 부호 \pm 는 진행 방향을 나타낸다. κ 값은 각 모드간의 결합 계수 성분으로 다음

$$\begin{aligned} \kappa_{aa} &= \frac{\omega}{4} \int_{-\infty}^{\infty} E_a(x)\Delta\epsilon(x)E_a^*(x)dx \\ \kappa_{bb} &= \frac{\omega}{4} \int_{-\infty}^{\infty} E_b(x)\Delta\epsilon(x)E_b^*(x)dx \\ \kappa_{ab} &= \kappa_{ba}^* = \frac{\omega}{4} \int_{-\infty}^{\infty} E_a(x)\Delta\epsilon(x)E_b^*(x)dx \end{aligned} \quad (2)$$

을 통해 계산 된다. 이때 $\Delta\epsilon$ 은 격자에서의 유전율 차이를 나타내고 균일한 격자 충진율을 고려하였을 때 $\Delta\epsilon = n_{core}^2 - n_{grat}^2$ 로 나타난다.

결합 선택 파장은 위상 정합 조건

$$\begin{aligned} \Delta\beta_{a,b} &= \beta_{a,b} - \pi/\Lambda = 0 \\ \Delta\beta_{ab} &= \beta_a - \beta_b - 2\pi/\Lambda = 0 \end{aligned}$$

에 따라 그림 2를 통해 격자 주기가 결정된다. 이때 $\beta_{a,b}$ 는 각 모드의 파수를 나타내고 Λ 는 격자의 주기를 나타낸다. 위 방정식을 $A^\pm(z), B^\pm(z)$ 에 대해 정리하여 각 모드간의 결합 효율을 계산한다[11]. 본 논문에는 역방향 결합된 결합효율을 격자 구조의 시작 지점에서의 모드의 크기의 비로 $\eta = B^-(0)/A^+(0)$ 을 통하여 계산하였다.

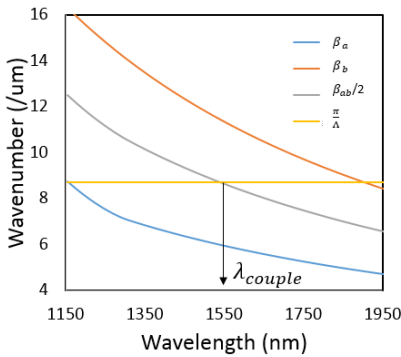


그림 2. 위상 정합 조건
Fig. 2 Phase match condition

2.2 구조 설계

결합 구조를 설계하기에 앞서 구조에 대한 1차원 가정을 하였다. 이러한 가정은 각종 변수들의 이해를 높이기 위한 CMT 분석에 적절하다.

설계 구조는 그림 1에서 나타난 것과 같이 위쪽에는 한쪽 면이 연마된 표준 단일 모드 광섬유로 두께 (t_{wg1}) 8.2 μ m를 갖으며 실리콘 도파로 역시 단일 모드를 갖는 두께(t_{wg2}) 230nm를 선택하였다. 두 도파로 사이의 여유 간격(t_{gap})은 500nm 수준으로 가정하였다. 격자는 높은 굴절률 차이를 갖도록 공기 도랑을 갖는 구조를 설정하였다. 격자 구조의 주기는 결합 선택 파장에서 위상 정합 조건에 따라

$$\Lambda = \frac{\lambda_{couple}}{n_{mode_o} + n_{mode_i}} \quad (4)$$

로 선택할 수 있으며 격자 구조의 길이는 설계하고자 하는 결합 효율과 결합계수를 고려하여

$$L = \text{arcTanh}(\sqrt{\eta})/\kappa_{ab} \quad (5)$$

으로 결합 길이를 선택한다[12]. 시뮬레이션에서는 격자 깊이 변화에 따른 유효 굴절률 변화를 고려할 때 주기의 변화를 확인하고 격자 길이를 1mm까지 증가시키며 결합 효율의 변화를 식 (5)의 결과와 비교한다. 이때 결합 파장은 1550nm 인근에서 나타나도록 하였다.

III. 결 과

유한요소법(FEM) 방식은 주파수 영역에서의 맥스웰 방정식을 풀이하는 대표적인 수치 해석적 방법으로써 이용된다. 주어진 기하구조를 미소 영역으로 분할하여 이들 간의 연계를 통하여 해석을 진행한다. CMT 계산보다 좀 더 일반적이고 다중적인 현상을 복합적으로 고려할 수 있는 반면 계산 시간이 길고 현상에 대한 직접적인 분석이 어렵다는 단점이 있다. FEM 방식을 통한 시뮬레이션 결과와 CMT 계산 결과를 비교 분석함으로써 CMT 모델링의 부족한 부분을 보충하고 현상에 대한 이해를 높이고자한다. 본 논문에서는 널리 알려진 범용 상용 툴인 COMSOL 프로그래를 통해 FEM 시뮬레이션을 하였다.

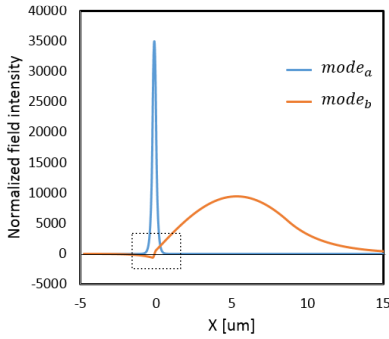


그림 3. 각 모드 전기장 분포.
Fig. 3 Each mode electric field distribution

그림 3은 결합기 구조에서의 두 중첩 모드의 전기장 분포를 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 두 도파로의 비대칭성으로 인해 두 중첩 모드는 결합되기 전 각각의 도파로의 도파 모드와 유사하게 각 도파로의 코어 부분에 집중된 전기장 분포를 보인다. 그러나 세부적으로 살펴보면 $mode_b$ 의 경우 광섬유 도파 모드와 달리 기수 모드 결합으로 인해 전기장의 부호가 바뀌는 부분이 발생한다.

그림 4(a)은 격자의 깊이에 따른 결합 계수(κ_{12})의 경향성을 나타낸다. 결합 계수는 식 (2)을 통해 두 모드의 격자 구간에서 중첩 적분을 통해 계산된다. 그림3에서 점선 박스에서 보는 것과 같이 $mode_b$ 는 격자 구조 내에서 전기장의 부호가 바뀌는 지점이 있기 때문에 격자 깊이에 따른 결합계수가 증가와 감소가 번갈아 나타나는 형태를 보였다. CMT 계산인 파란 실선과 FEM 계산인 회색 실선을 비교한 결과 두 결합 계수 간에 큰 차이를 보이는 것을 확인 하였다. 실리콘 도파로 내의 공기 도랑 격자 구조가 갖는 큰 굴절률 차이($\Delta\epsilon$)는 격자가 없을 때 도파 모드의 유효 굴절률에 많은 영향을 미치기 때문에 이를 고려하여 격자 영역에서

$$n_{avg} = FF \times n_{Si} + (1 - FF) \times n_{air} \quad (6)$$

평균 굴절률 적용해야 할 필요가 있다. 여기서 FF는 실리콘과 공기 도랑의 비(충진률)를 나타내고 n_{Si}, n_{air} 는 각각 실리콘과 공기의 굴절률을 나타낸다. 평균 굴절률을 고려하여 계산한 주황 실선과 FEM 결과인 회색 실선은 170nm 깊이까지는 매우 잘 일치하는

모습을 보였다. 하지만 170nm 이후 깊이에 대해서는 여전히 큰 오차를 보였다. 이는 너무 깊은 깊이에 대해서는 격자로 인한 산란 효과로 인해 결합 효과가 사라지는 것으로 볼 수 있다.

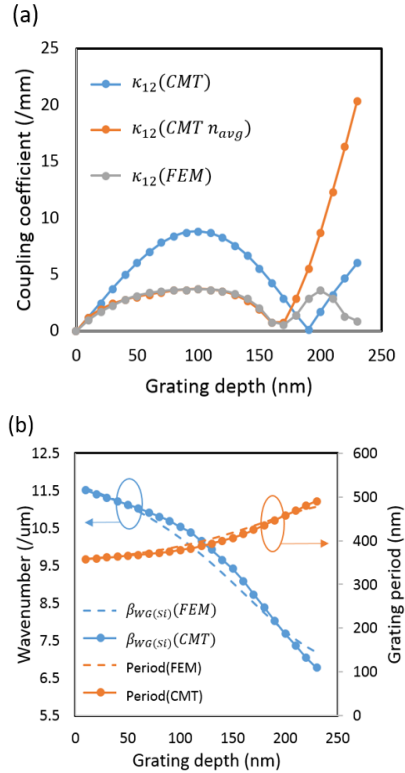


그림 4. (a)격자 깊이에 따른 결합 계수, (b) 실리콘 도파로의 파수 변화와 격자 주기의 변화
Fig. 4 (a) Coupling coefficient, (b) Wavenumber of Si waveguide and grating period as a function of the grating depth.

격자 영역의 평균 굴절률 적용은 실리콘 도파모드의 유효 굴절률을 크게 변화시켜 위상 정합 조건도 변화 된다. 따라서 선택 파장을 위한 격자의 주기 조건도 변화 된다. 그림 3(b)에서는 동작 파장을 1550nm로 고정하였을 때 격자의 깊이에 따른 실리콘 도파모드의 유효 굴절률 변화와 주기의 변화를 나타내준다. 식 (4)에서 보는 바와 같이 실리콘 도파로의 유효 굴절률이 점점 감소함에 따라 격자의 주기는 증가하는 양상을 보인다. 평균 굴절률(n_{avg})을 넣어 계산한 CMT 결과와 FEM 결과가 유사한 경향을 보였다.

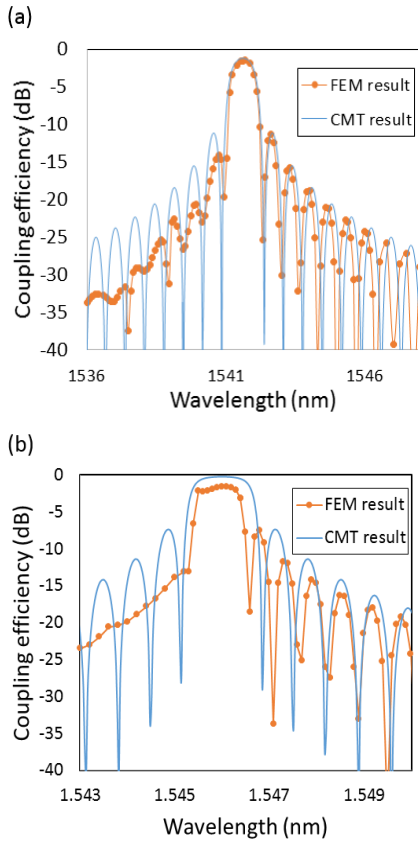


그림 5. 격자 깊이 (a) 20nm와 (b) 50nm에 대한 결합 효율 스펙트럼

Fig. 5 Spectrum of coupling efficiency with grating depth (a)20nm (b) 50nm, respectively

그림 5(a), (b)는 격자 길이(L) 700 μ m에서 격자 깊이 20nm, 50nm에 대한 결합 효율 스펙트럼을 보여준다. 두 경우 모두 70% 수준의 결합 효율과 1~2nm의 대역폭을 보였다. 격자의 주기는 유효 굴절률의 적용과 수치 해석적 오차를 고려하여 같은 결합 주파수를 갖도록 각각 0.4nm, 1.4nm 정도 보정하여 주었다. 20nm 격자 깊이의 스펙트럼은 중심파장과 장파장 영역에서는 상당히 일치하는 결과를 보이나 단파장 영역에서는 산란 효과로 인해 공진 효과가 약해지는 모습이 나타나기 시작하였다. 50nm 깊이의 스펙트럼에서는 중심 주파수 영역까지 산란 효과가 더해져 CMT 결과에 비해 낮은 결합 효율과 좁은 대역폭을 보였다. 그림 6(c), (d)는 결합기의 파원의 위치와 격

자의 시작부분이 있는 초입부분에서 전기장의 진행을 보여준다. 광섬유 쪽으로 들어가는 입사파가 대부분 실리콘 도파로 쪽으로 결합되어 되돌아 나오는 모습을 확인할 수 있다. 또한 격자 구조 영역에서 전기장 분포를 통해 20nm 비해 50nm에서 산란 효과가 강하게 형성되는 것을 볼 수 있다.

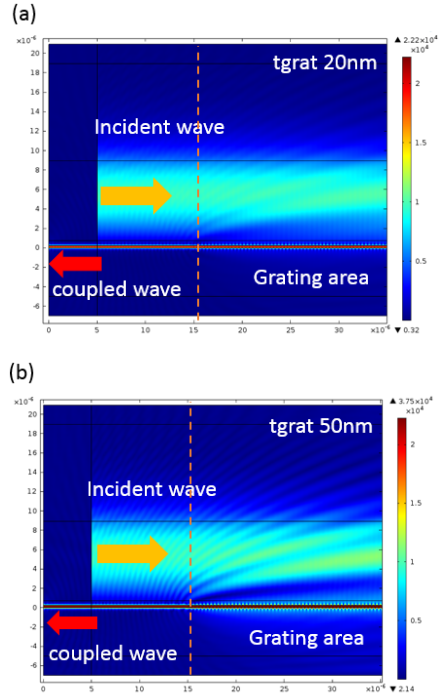


그림 6. (a) 격자 깊이 20nm와 (b) 50nm에 대한 전기장 분포.

Fig. 6 Electric field distribution with grating depth (a)20nm (b) 50nm, respectively

격자의 산란효과는 격자의 깊이 뿐 아니라 격자 길이에도 영향이 있다. 그림 5는 격자 길이에 따른 결합 효율을 보여준다. CMT로 계산한 결과를 보면 50nm의 격자의 깊이에서 더 높은 결합 계수를 갖기 때문에 항상 결합 효율을 갖는다. 그러나 FEM 결과를 보면 50nm의 경우는 길이 500 μ m에서도 큰 오차를 보이며 길이가 길어져도 70% 수준의 효율에 머물러 있는 모습을 보이고 반면 20nm 격자 깊이의 경우 길이에 따라 결합 효율이 점점 증가하여 1mm 수준에서 83%정도 결합 효율을 보였다. 이는 격자로 인한 산란 효과로 인해 도파로 내에서 빠져나가 손실된 에

너지 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 따라서 결합기 설계에 있어서 짧은 영역에서 높은 효율을 원한다면 깊은 격자를 활용하는 것이 유리한 반면 최대 결합 효율의 감쇠는 감수 하여야 한다. 한편 최대 결합 효율을 높이기 위해서는 격자 깊이를 줄이고 격자의 길이를 늘이는 결합기 설계하여야 한다.

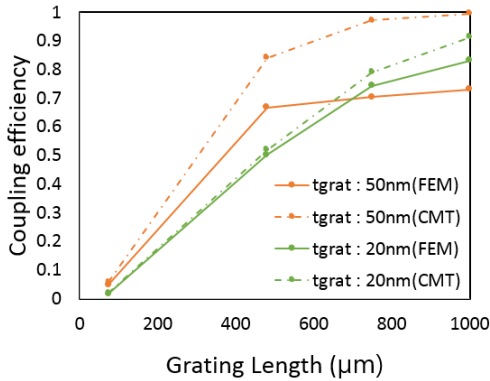


그림 7. 격자 길이에 따른 결합 효율
Fig. 7 Coupling efficiency with grating length

IV. 결 론

본 연구에서는 격자구조를 이용한 광섬유와 실리콘 도파로 간의 파장 선택적 역방향성 결합기를 설계하였다. 제안한 설계 구조에서 격자의 깊이의 변화에 따라 결합 모드 이론과 유한요소법으로 결합 특성을 시뮬레이션하고 결과를 비교했다. 그 결과 높은 굴절률 차이를 보이는 격자 구조의 경우 CMT 분석에 있어서 격자부분에 평균 굴절률을 적용한 계산을 하여야 결합계수와 결합 주파수의 오차를 줄일 수 있었다. 격자의 깊이가 점점 깊어질 경우 격자에 의한 산란 효과의 증가로 인해 결합 효과가 줄어든다. 또한 격자 길이가 증가함에 따라 산란에 의해 도파로를 빠져나가는 에너지로 인해 결합 효율이 일정량 이상 더 증가하지 않았다. 따라서 결합기 설계에 있어서 원하는 결합 효율을 얻기 위해 격자의 깊이, 길이, 결합 계수와 더불어 격자의 산란효과를 복합적으로 고려할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음

References

- [1] E. Kim, "Implementation of weight sensor with polarization maintaining photonic crystal fiber," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 133-138
- [2] K. Choi, "Effect of spectral drift to coherent optical fiber sensor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 3, 2016, pp. 277-282.
- [3] Z. Yang, N. Fang, A. Wu, J. Chen, M. Zhang, X. Wang, and S. Zou, "Fabrication and characterization of integrated three-dimensional linear taper on silicon-on-insulator," *Optical Engineering*, vol. 48, no. 3, 2009, pp. 030503(1)-030503(3).
- [4] D. Taillaert, W. Bogaerts, P. Bienstman, T. F. Krauss, P. Daele, I. Moerman, and R. Baets, "An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 7, 2002, pp. 949-955.
- [5] F. Laere, G. Roelkens, M. Ayre, J. Schrauwen, D. Taillaert, D. Thourhout, and R. Baets, "Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides," *J. of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 1, 2007, pp. 151-156.
- [6] J. Song and J. Ding, "Silicon Nanowire Waveguides and Their Applications in Planar Wavelength Division Multiplexers/Demultiplexers," *Nanowires-Fundamental Research*, July 19, 2011.
- [7] L. Dong, P. Hua, T. A. Birks, L. Reekie, and P. Russell, "Novel add/drop filters for wavelength-division-multiplexing optical fiber systems using a Bragg grating assisted mismatched coupler," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 12, 1996, pp.

- 1656-1658.
- [8] P. Yeh and H. Taylor, "Contradirectional frequency-selective couplers for guided-wave optics," *Applied Optics*, vol. 19, no. 16, 1980, pp. 2848-2855.
- [9] J. Weber, "Spectral characteristics of coupled-waveguide Bragg-reflection tunable optical filter," *IEE Proc. J. (Optoelectronics)*, vol. 140, no. 5, 1993, pp. 275-284.
- [10] C. Bulmer and M. Wilson. "Single mode grating coupling between thin-film and fiber optical waveguides," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 14, no. 10, 1978, pp. 741-749.
- [11] W. Shi, X. Wang, C. Lin, H. Yun, Y. Liu, T. Jones, and L. Chrostowski, "Silicon photonic grating-assisted, contra-directional couplers," *Optics Express*, vol. 21, no. 3, 2013, pp. 3633-3650.
- [12] T. Erdogan, "Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters," *J. of the Optical Society of America A*, vol. 14, no. 8, 1997, pp. 1760-1773.

저자 소개



허형준(Hyung-Jun Heo)

2013년 아주대학교 전자공학과 졸업
(공학사)

2013년 ~ 현재 아주대학교 대학원
전자공학과 석박통합과정

※ 관심분야 : 광통신시스템, 광소자



김상인(Sang-In Kim)

1992년 KAIST 전기및전자공학과(공
학사)

1997년 미네소타대학교 대학원 전자
공학과 졸업(공학박사)

2003년 ~ 현재 아주대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신시스템, 양자통신

