

論文97-34D-7-11

다중모드 간섭결합기와 광도파로열로 구성된 저손실 NxN 광도파로 격자 파장 라우터의 설계

(Design of a Low Loss NxN Waveguide Grating Router Composed of Multimode Interference Couplers and Arrayed Waveguide Grating)

文 盛 煜 * , 鄭 榮 哲 *

(Sungwook Moon and Youngchul Chung)

요 약

지금까지 가장 잘 알려진 광도파로 격자 파장 라우터의 형태는 방사형 성형결합기와 광도파로열로 구성된 것이다. 하지만 이러한 구조는 일반적으로 약 3 dB 정도의 방사 손실을 동반하는 것으로 알려졌다. 따라서 손실을 줄일수 있는 개선된 광도파로 격자 파장 라우터의 설계가 요구된다. 본 논문에서는 뛰어난 균형성과 제작 오차에 대한 둔감성 그리고 저손실로 각광을 받고 있는 다중모드 간섭결합기로 구성된 광도파로 격자 파장 라우터를 제안하며 각 출력단에 주어진 채널 파장을 효율적으로 배정하여 적절한 광도파로열의 경로차를 찾아내는 알고리즘을 제안한다. 유한 차분 빔전파 방법을 이용한 전산 모의 실험 결과 제안된 광도파로 격자 파장 라우터는 각 채널 파장에서 4x4 경우에는 0.3 dB 이하의 잉여 손실과 -25 dB 이하의 누화를, 8x8 경우에는 0.4 dB 이하의 잉여 손실과 -25 dB 이하의 누화를 갖는 구조임을 확인하였다.

Abstract

Untill now, the most well-known configuration for waveguide grating router(WGR) is composed of radiative star couplers and arrayed waveguide grating(AWG), which usually suffer from the radiation loss of around 3 dB or more. Therefore, the improved design of WGRs is needed to reduce the loss. In this paper, we propose a novel WGR composed of multimode interference couplers which have good uniformity, fabrication tolerance, and very low excess loss, and suggest the efficient algorithm to find the proper path length differences of AWG for given channel spacing and channel assignment to each output port. The simulated spectral responses of the proposed WGR using the finite difference beam propagation method(BPM) show that the excess loss is less than 0.3 dB and the crosstalk less than -25 dB in case of 4x4 WGR, and the excess loss less than 0.4 dB and the crosstalk less than -25 dB in case of 8x8 WGR for all the channel wavelengths.

I. 서 론

미래의 사회에서 발생할 수 있는 채널의 요구량을

* 正會員, 光云大學校 電子工學部

(Dept. School of Electronics Engineering Kwang-woon University)

※ 본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구(951-0916-013-2) 및 1997년 광운대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

接受日字:1997年1月31日, 수정완료일:1997年6月10日

해결하기 위한 여러 가지 다중화 방법이 광통신 분야에서 소개되었으며 그 가운데 WDM(Wavelength Division Multiplexing)은 기존의 광통신 시스템에 부가적인 장치 없이 채널의 효율적인 사용이 가능하므로 크게 각광을 받고 있다. WDM 시스템을 실현하기 위해서는 동조 가능한 DBR(Distributed Bragg Reflector) 반도체 레이저와 수동필터 등이 필요하며 그 중에서도 광도파로 격자 파장 라우터(WGR: Waveguide Grating Router)는 Optical path routing과 Add/Drop 필터 등의 중요한 역할을 수행

한다. 최근에는 기존의 반도체 기술을 그대로 원용하여 대량 생산에 용이한 집적 형태가 제시되었으며 집적된 형태의 대표적인 구조는 방사형 성형결합기로 구성된 광도파로 격자 파장 라우터이다. 방사형 성형결합기를 이용한 광도파로 격자 파장 라우터의 실현 가능성은 실리카 또는 III-V족 화합물에서 설계 및 제작된 결과를 통하여 입증되었다.^{[1], [2]} 한편, 방사형 성형결합기를 이용한 구조는 광파의 회절성을 이용한 소자이므로 출력단에서 받아들일 수 있는 광전력의 양이 한계가 있다. 즉 기존의 구조에서는 약 3 dB 정도의 방사 손실을 피하기가 어렵기 때문에 효율적인 광전력 전송을 고려한 저손실 NxN 광도파로 격자 파장 라우터의 필요성이 대두된다.^[3]

본 논문에서는 모양의 단순성에서 오는 우수한 재현성과 저손실 특성으로 최근에 관심을 받고 있는 다중모드 간섭(MMI: MultiMode Interference) 결합기로 구성된 NxN 광도파로 격자 파장 라우터를 처음으로 제안한다.

II. 다중모드 간섭결합기의 설계

다중모드 간섭 소자는 다중모드 도파로 내에서 존재할 수 있는 모드들의 위상 관계를 해석함으로써 광파의 도파축에 입사광의 전계분포가 일정한 주기로 단일 또는 다중 형태로 재생되는 다중모드 도파로의 특성을 이용한다. 다중모드 도파로에서의 self-image 현상은 일반적으로 도파모드 전파해석을 통해 설명되며 이러한 self-image 현상을 이용하여 분지 및 결합되는 광파를 얻을 수 있다.^{[4], [5]}

다중모드 간섭결합기를 광도파로 격자 파장 라우터에 사용하기 위해서는 다음과 같은 성격을 요구한다.

첫 번째로 요구되는 성질은 저손실 특성이다. 다중모드 간섭결합기는 광도파로 격자 파장 라우터내에서 광파의 분기 및 결합을 수행한다. 따라서 잉여 손실이 큰 다중모드 간섭결합기의 사용은 광도파로 격자 파장 라우터의 성능에 전반적인 영향을 끼치게 되므로 저손실 다중모드 간섭결합기의 설계가 요구된다.

일반적으로 Ridge 형태의 다중모드 간섭결합기는 이상적인 경우와 비교하여 광파의 구속력이 약하므로 다중모드 영역 안에서 Goos-Haenchen shift 효과가 발생한다.^[6] 따라서 도파모드가 느끼는 다중모드 도파로의 너비는 약간 커지게 되므로 각 모드의 전파상

수에 오차가 발생된다. 이러한 오차는 self-image 재생 위치에서 각 모드의 합성이 완벽하게 이루어 지지 않아 잉여손실을 발생시킨다.

따라서 보다 효율적이고 저손실인 다중모드 결합기를 설계하기 위해서 다중모드의 전영역에 걸쳐 깊게 식각한 구조를 고려하였다.^[7] 이것은 깊게 식각한 다중모드 영역에서는 광파의 구속력이 커져서 self-image를 형성하기 위해 참여하는 모드들의 전파상수가 해석상에 사용되는 모드와 같아지므로 다중모드 해석을 통한 설계가 용이해진다. 이러한 가능성을 8x8 다중모드 간섭결합기를 깊게 식각한 구조와 얇게 식각한 구조의 전산 모의 실험을 통하여 확인해 본 결과 얇게 식각한 구조일 경우 1.4 dB 정도의 잉여 손실이 있으며 깊게 식각한 구조에서는 0.2 dB 정도의 잉여 손실을 갖는 구조로 손실을 현저히 개선할 수 있다.

두 번째로 요구되는 다중모드 간섭결합기의 성질은 파장 변화에 따른 손실의 변화가 매우 작아야 한다. 다중모드 간섭결합기를 광도파로 격자 파장 라우터로 사용하기 위해서는 약 수십 nm 정도의 Free Spectral Range가 요구된다. 이런 범위 내에서 존재하는 신호들이 다중화되어 다중모드 간섭결합기에 들어왔을 때 파장과 무관하게 분기특성을 유지해야 한다. 다중모드 간섭결합기에서 파장의 변화에 손실의 변화는 소자의 길이와 비례하다. 따라서 본 논문에서는 파장 변화에 대한 무관한 손실 특성을 얻기 위해서 소자의 길이를 최대한 짧게 하였다. 참고 문헌 [4], [5]에 따르면 다중모드 영역의 길이는 소자의 다중모드 영역의 너비에 제공하여 증가되므로 도파로 사이의 간격을 상호 결합이 발생하지 않는 범위 내에서 최대한 근접시켜 놓았다. 8x8 다중모드 간섭기를 전산 모의 실험한 결과 다중모드 영역의 너비가 각각 40 μm 일때와 80 μm 일때 0.5 dB 잉여 손실이 발생하는 파장 대역폭이 각각 24 nm와 8 nm로 파장의 의존성이 다중모드 간섭결합기의 도파로 사이의 간격에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

III. 광도파로열의 설계

그림 1에 제안된 광도파로 격자 파장 라우터를 보였으며 그 동작은 다음과 같다. 먼저, 첫 번째 다중모드 간섭결합기는 일반 간섭 효과를 이용하여 임의의 위치에 입사된 광전력을 균일하게 도파로열로 분기시

켜 주는 역할을 수행한다. 그리고 분기되어 AWG로 유도된 광파들은 각 도파로의 경로 차이에 따라 위상을 달리하여 두 번째 다중모드 간섭결합기에 도달한다. 도파로열이 갖는 경로 차이들이 적절히 조정된 경우 파장에 따라 두 번째 다중모드 간섭결합기의 특정한 출력 위치에 재생되어 제안된 구조가 WDM 소자로서 동작을 하게 된다.

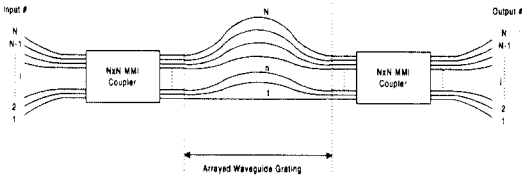


그림 1. 다중모드 간섭결합기로 구성된 새로운 NxN 광도파로 격자 파장 라우터의 개략도.
Fig. 1. A schematic layout of a novel NxN waveguide grating router composed of multimode interference couplers.

1. 광도파로열에서 광파의 위상 해석

제안된 NxN 광도파로 격자 파장 라우터의 광도파로열에서 위상 관계는 다음과 같이 해석할 수 있다. 먼저 NxN 다중모드 간섭결합기에서 출력된 광파의 위상을 입력단과 출력단의 위치에 따라 분류를 한다. 그림 2와 같이 첫 번째 다중모드 간섭결합기의 임의의 입력단(i)이 여기될 때 출력단 번호 1을 기준으로 출력단(n)에서의 분기된 광파의 위상($\Delta \phi_{1n}^i$)는 출력단에 따라 서로 다른 값을 갖는다. 여기서 i와 n은 $1 \leq i \leq N, 2 \leq n \leq N$ 를 만족하는 정수이다.

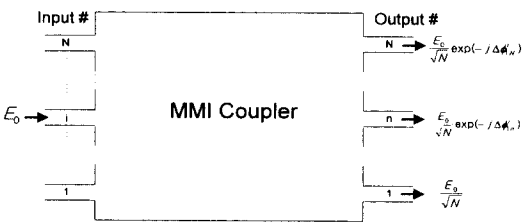


그림 2. 입력단 i에 광파가 여기되었을 때 NxN 다중모드 간섭결합기에 의해 분기된 광파의 위상을 나타내는 개략도.
Fig. 2. A schematic drawing showing the relative phase of split optical wave in an NxN multimode interference coupler when the i-th input is excited.

그리고, 그림 3과 같이 두 번째 다중모드 간섭결합기

의 임의의 출력단(j)에 상이 발생하기 위한 1번 입력단을 기준으로 임의의 입력단(n)에서 요구되는 광파들의 위상을 $\Delta \phi'_{1n}^j$ 로 표기한다. 여기서 j와 n은 $1 \leq j \leq N, 2 \leq n \leq N$ 를 만족하는 정수이다.

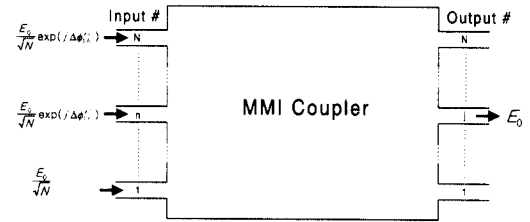


그림 3. 출력단 j에 상이 맺히기 위한 NxN 다중모드 간섭결합기에 요구되는 입력 광파의 위상을 나타내는 개략도.
Fig. 3. A schematic drawing showing the relative phase of input optical waves to focus on output waveguide j in an NxN multimode interference coupler.

그러면, i번째 입력단에서 입사하였을 때 j번째 출력단으로 상이 발생하기 위하여 필요한 각 도파로열 n ($2 \leq n \leq N$) 에서 발생해야 하는 위상(도파로 1번을 기준으로 함)은 다음과 같다.

$$\Delta \phi_{1n}^{i,j} = \Delta \phi_{1n}^i - \Delta \phi'_{1n}^j \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 광도파로의 상대 위상 $\Delta \phi_{1n}^{i,j}$ ($n=2 \dots N$) 가 특정 파장에서 만족하면 광도파로 격자 파장 라우터의 입력 i에 여기된 광파는 출력 j에 상이 맺히게 된다.

각각의 경로 차이 ΔL_{1n} (도파로 n과 도파로 1과의 경로 차이)는 식 (1)을 통해 얻은 광파의 상대 위상과 광도파로열(AWG)에서 발생하는 광파의 위상을 이용한 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\Delta \phi_{1n}^{i,j} + 2\pi m_{1n}^{i,j} = \frac{2\pi}{\lambda^{i,j}} n_{eff} \Delta L_{1n} \quad (2)$$

여기서, n_{eff} 는 단위 도파로에서 광파가 느끼는 유효 굴절율이고 $m_{1n}^{i,j}$ 는 0,1,2... 와 같은 정수이다. 입력단 i로 입사한 광파는 출력단 j로 $\lambda^{i,j}$ 의 채널 파장을 출력하기 위해서는 식 (2)를 만족하는 경로 차이 집합 $\{\Delta L_{12}, \dots, \Delta L_{1n}, \dots, \Delta L_{1N}\}$ 을 찾아야 한다. 이 집합을 결정하기 위해서는 먼저 채널 파장($\lambda^{i,j}$)의 할당 문제를 고려해야 한다. 임의의 채널 파장 집합 $\{\lambda_1, \dots$

$\lambda_k, \dots, \lambda_N$)을 설정하고 식 (2)를 만족하는 경로 차이 집합 및 WGR의 출력단에 할당되는 파장을 구한다. 물론 채널 파장($\lambda^{i,j}$)은 다음의 범위내에서 결정한다.

$$\lambda^{i,j} \in \{ \lambda_1, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_N \} \quad (3)$$

NxN 광도파로 격자 파장 라우터는 여기된 입력단의 위치(i)와 상이 맷히는 출력단의 위치(j)에 따라 여파되는 채널 파장($\lambda^{i,j}$)을 다르게 할당해야 한다. 예를 들어 4x4 (N=4) 광도파로 격자 파장 라우터의 경우에는 경로 차이를 찾기 위해서 표 1과 같이 임의의 채널 파장을 초기화 조건으로 이용한다.

표 1. 4x4 광도파로 격자 파장 라우터 경우 경로 차이를 찾기 위한 채널 파장의 초기화 배열 상태

Table 1. An initial assignment state of channel wavelengths to find the proper path length differences in case of 4x4 waveguide grating router.

출력단 \ 입력단	1	2	3	4
1	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
2	λ_2	λ_3	λ_4	λ_1
3	λ_3	λ_4	λ_1	λ_2
4	λ_4	λ_1	λ_2	λ_3

그리고 식 (2)를 다음과 같이 경로 차이의 관계로 변환을 한다.

$$\Delta L_{1n}^{i,j} = \frac{\lambda^{i,j} (\Delta \Phi_{1n}^{i,j} + 2\pi m)}{2\pi n_{eff}} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하면 (N-1)개의 경로차 중 하나인 ΔL_{1n} 를 찾기 위해서는 채널 파장 집합 $\{ \lambda_1, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_N \}$ 의 범위안에서 결정된 N^2 개의 채널 파장($\lambda^{i,j}$)과 입력단과 출력단의 변화에 따라 N^2 개의 위상 차이 ($\Delta \Phi_{1n}^{i,j}$)를 고려하면서 정수 m을 단순히 증가 시킨다. 이때 m의 증가는 서로 다른 경로 차이값들 ($\Delta L_{1n}^{i,j}$)을 생성시킨다. 결국, 식 (4)에 의해 생성된 다른 경로 차이값들이 어떤 i, j, l, m ($1 \leq i, j, l, m \leq N$)을 만족하는 정수에 대해서 $\Delta L_{1n}^{i,j} = \Delta L_{1n}^{l,m}$ 을 만족하는 경로 차이(ΔL_{1n})를 찾아내도록 값을 수렴시켜야 한다.

계산된 경로 차이들 ($\Delta L_{1n}^{i,j}$)을 비교 대상인 정규화 경로 차이($\Delta L'_{1n}^{i,j}$)로 다음과 같이 나타내었다.

$$\Delta L'_{1n}^{i,j} = \Delta L_{1n}^{i,j} \pm \frac{\lambda^{i,j}}{n_{eff}} l \quad (5)$$

여기서, l은 정수이다.

식 (6)과 같은 허용 오차 범위를 만족하는 경로 차이가 존재할 때 비로소 파로 경로 차이(ΔL_{1n})가 결정된다.

$$| \Delta L_{1n}^{l,l} - \Delta L'_{1n}^{i,j} | < \epsilon \quad (6)$$

경로 차이를 구할 때 허용 오차인 ϵ 는 파장의 $\frac{1}{100}$ 정도로 한다.

그러나, 만약 식 (6)까지의 과정을 거쳐 수렴된 값을 찾아내지 못한다면 표 1에 나타난 N개의 채널 파장의 배열 순서를 바꾸어 식 (4)부터 다시 시작해야 한다. 채널 파장의 할당 방법의 전체 경우의 수는 $(N!)^N$ 가 되며 이 모든 경우수를 반복하면서 경로 차이가 수렴하는 채널 파장의 배열을 찾아 내게 된다. 이러한 결과는 임출력단의 갯수가 커질수록 고려할 채널 파장 조합수가 기하급수적으로 증가되므로 이에 따른 전산 처리 소요시간이 문제가 된다. 따라서 보다 효율적으로 NxN 광도파로 격자 파장 라우터의 경로 차이를 찾아내는 알고리즘을 구할 필요가 있다.

2. 상대 위상의 관계 분석을 통한 효율적인 광도파로열의 경로 차이 결정 방법

광도파로열에서 만족해야 하는 식 (1)의 위상들을 여기된 입력단에 대응하여 각각의 출력단에 상이 발생하기 위한 상대 위상들의 집합으로 분류한다. 분류된 상대 위상의 집합을 살펴봄으로서 임의의 입력단이 여기될 때 출력단에 상이 발생하기 위해서 광도파로열이 만족해야 하는 상대 위상 집합의 관계를 알 수 있다. 상대 위상 집합의 상호 독립성은 동일한 입력단이 여기 된다는 조건 하에서 원소들의 구성과 위치가 같은 상대 위상 집합이 하나 이상 존재하지 않는 성질을 의미한다.

즉, i번째 입력단이 여기되는 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{ \Delta \Phi_{12}, \dots, \Delta \Phi_{1n}, \dots, \Delta \Phi_{1N} \}^{i,k} \neq \{ \Delta \Phi_{12}, \dots, \Delta \Phi_{1n}, \dots, \Delta \Phi_{1N} \}^{i,j}, k \neq j \quad (7)$$

더우기, l 번째 입력단($l \neq i$)이 여기 되는 경우 각각의 m 번째 출력단으로 상이 발생하기 위하여 필요한 도파로열에서의 상대 위상 집합

$$\{ \Delta \phi_{12}, \dots, \Delta \phi_{1m}, \dots, \Delta \phi_{1N} \}^{l,m}, m=1, \dots, N$$

은 i 번째 입력단이 여기되는 경우에 필요한 상대 위상 집합들

$$\{ \Delta \phi_{12}, \dots, \Delta \phi_{1m}, \dots, \Delta \phi_{1N} \}^{i,k}, k=1, \dots, N$$

중에서 어느 하나가 중복되지 않게, 즉 $i \neq l$ 인 경우

$$\{ \Delta \phi_{12}, \dots, \Delta \phi_{1m}, \dots, \Delta \phi_{1N} \}^{i,j} \neq \{ \Delta \phi_{12}, \dots, \Delta \phi_{1m}, \dots, \Delta \phi_{1N} \}^{l,j} \quad (8)$$

의 조건을 만족하고 있음을 관측할 수 있다.

이러한 성질을 4x4 광도파로 격자 파장 라우터에 필요한 상대 위상들을 이용하여 구체적으로 살펴보았다. 표 2에 나타난 입출력단의 변화에 따른 4x4 광도파로 격자 파장 라우터의 상대 위상 집합을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 1번째 입력단을 여기서시켰을 경우에 1번째 출력단에, 2번째 입력단의 경우에는 3번째

출력단에, 3번째 입력단의 경우에는 2번째 출력단에, 그리고 4번째 입력단의 경우에는 4번째 출력단에 상이 발생하기 위한 상대 위상 집합이 동일하다. 또 1번째 출력단의 경우뿐 아니라 2, 3 그리고 4번째 출력단에 상이 맺히기 위한 경우에서 광도파로열이 만족해야 하는 위상 차이 집합들에도 이러한 현상이 반복되어 나타난다.

이러한 위상 차이 집합의 관계들은 어떤 입력단이 여기될 때 j 번째 출력단으로 출력되기 위한 임의의 상대 위상 집합($\Delta \phi_{12}, \dots, \Delta \phi_{1m}, \dots, \Delta \phi_{1N}$)이 다른 입력단(i 번째 도파로가 아닌 경우)이 여기될 때 같은 출력단(j)에 발생하기 위한 상대 위상 집합과 중복되지 않기 때문에, 즉 식 (8)이 만족되기 때문에 파장 배열 문제에 중요한 단서가 된다. 따라서 같은 형태의 상대 위상 집합마다 특정 채널 파장을 대응시키면 중복되지 않게 여기되는 입력단에 따른 출력단의 채널 파장을 배열할 수 있다.

만약, 1 번째 입력단이 여기된 경우에 채널 파장(λ_k')을 출력단에 일대일 대응으로 할당을 했다고 가정을 하면 표 2에서 확인된 상대 위상들의 관계로부터 상대 위상 집합마다 한 채널 파장을 할당하는 것이 가

표 2. 4x4 광도파로 격자 파장 라우터를 구성하기 위한 광도파로열이 만족해야 하는 상대 위상
Table 2. Relative phase of split optical wave in the propagation of AWG for a 4x4 waveguide grating router.

(a) 1번째 입력 단이 여기될 때 (위상 차이 집합= $\{ \Delta \phi_{12}, \Delta \phi_{13}, \Delta \phi_{14} \}$)	
출력단 1에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 3\pi/2, 3\pi/2, 2\pi \}$	
출력단 2에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 2\pi, \pi, \pi \}$	
출력단 3에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi, 2\pi, \pi \}$	
출력단 4에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi/2, \pi/2, 2\pi \}$	
(b) 2번째 입력 단이 여기될 때	
출력단 1에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 2\pi, \pi, \pi \}$	
출력단 2에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi/2, \pi/2, 2\pi \}$	
출력단 3에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 3\pi/2, 3\pi/2, 2\pi \}$	
출력단 4에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi, 2\pi, \pi \}$	
(c) 3번째 입력 단이 여기될 때	
출력단 1에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi, 2\pi, \pi \}$	
출력단 2에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 3\pi/2, 3\pi/2, 2\pi \}$	
출력단 3에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi/2, \pi/2, 2\pi \}$	
출력단 4에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 2\pi, \pi, \pi \}$	
(d) 4번째 입력 단이 여기될 때	
출력단 1에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi/2, \pi/2, 2\pi \}$	
출력단 2에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ \pi, 2\pi, \pi \}$	
출력단 3에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 2\pi, \pi, \pi \}$	
출력단 4에 여파하기 위한 광도파열이 만족해야 하는 상대 위상 집합= $\{ 3\pi/2, 3\pi/2, 2\pi \}$	

능함을 알 수 있다. 따라서 1 번째 입력단이 여기될 때 1 번째 출력단에 나올 채널 파장을 λ_1' 라고 하면 2 번째 입력단일 경우에는 3 번째 출력단에, 3 번째 입력단일 경우에는 2 번째에, 그리고 4 번째 입력단일 경우에는 4 번째 출력단에 λ_1' 이 채널 파장으로 결정한다. 따라서 입력단에 따른 출력단의 채널 파장(λ_k')을 배열하면 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

표 3. 상대 위상들의 관계를 이용하여 예측된 4x4 광도파로 격자 파장 라우터의 채널 파장 배열

Table 3. Expected assignment state of channel wavelengths using the relations of relative phases in case of 4x4 waveguide grating router.

출력단 \ 입력단	1	2	3	4
1	λ_1'	λ_2'	λ_3'	λ_4'
2	λ_2'	λ_4'	λ_1'	λ_3'
3	λ_3'	λ_1'	λ_4'	λ_2'
4	λ_4'	λ_3'	λ_2'	λ_1'

이러한 파장 라우팅 표의 활용은 N^2 개의 위상 차이를 고려하여 $N!^N$ 개의 채널 파장의 조합수를 발생시키면서 광도파로열의 경로 차이를 구했던과는 달리 예측된 채널 파장 배열을 이용하여 단지 1 번째 입력단이 여기될 때 N 개의 출력단에서 필요한 N 개의 위상 차이를 만족하는 채널 파장(λ_i')의 조합 가능한 $N!$ 개의 배열만을 발생시켜서 적당한 경로 차이와 채널 파장 배열을 구한다. 그 다음 나머지 $N-1$ 개의 입력단에 여기되는 경우는 채널 파장 라우팅표를 활용하여 자동적으로 각 출력단에서 여파되는 파장을 예측할 수 있다. 이것은 $N \times N$ 광도파로 격자 파장 라우터의 경로 차이 문제를 $1 \times N$ 구조의 경로 차이를 구하는 문제로 축소할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 문제의 단순화를 통하여 도파로 경로차를 찾아내는 탐색 시간을 단축할 수 있다.

결정된 채널 파장의 조합표를 활용하여 현재 WDM 표준화 움직임이 있는 1.6 nm (200 GHz) 채널 간격인 경우에 대해서 4x4 와 8x8 광도파로 격자 파장 라우터의 광도파로열의 경로 차이와 채널 파장 배열을 계산하였다.

4x4 경우를 예로 들면, 1 번째 입력단이 여기될 때

식 (4)부터 식 (6)까지 반복하면서 4!번 채널 파장의 배열을 바꿔가면서 계산하면 표 3에 나타난 바와 같이 채널 파장이 $\{\lambda_1(1556.4nm), \lambda_2(1551.6nm), \lambda_4(1554.8nm), \lambda_3(1553.2nm)\}$ 인 배열일 때 경로 차이(ΔL_{1n})가 수렴함을 알 수 있다. 따라서 결정된 배열을 표 3에 $\lambda_1' \leftarrow \lambda_1(1556.4nm), \lambda_2' \leftarrow \lambda_2(1551.6nm), \lambda_3' \leftarrow \lambda_4(1554.8nm), \lambda_4' \leftarrow \lambda_3(1553.2nm)$ 으로 대체하면 표 4(a)을 완성시킬 수 있다. 8x8인 경우의 라우팅표는 표 4(b)에 보였다.

표 4. 광도파로 격자 파장 라우터의 라우팅 표

(a) 4x4 광도파로 격자 파장 라우터의 경우 ($\lambda_1=1556.4nm, \lambda_2=1551.6nm, \lambda_3=1553.2nm, \lambda_4=1554.8nm$), (b) 8x8 광도파로 격자 파장 라우터의 경우 ($\lambda_1=1550.0nm, \lambda_2=1551.6nm, \lambda_3=1553.2nm, \lambda_4=1554.8nm, \lambda_5=1556.4nm, \lambda_6=1558.0nm, \lambda_7=1548.4nm, \lambda_8=1546.8nm$)

Table 4. Routing tables of (a) 4x4 waveguide gating router and (b) 8x8 WGR.

(a)

출력단 \ 입력단	1	2	3	4
1	λ_1	λ_2	λ_4	λ_3
2	λ_2	λ_3	λ_1	λ_4
3	λ_4	λ_1	λ_3	λ_2
4	λ_3	λ_4	λ_2	λ_1

(b)

출력단 \ 입력단	1	2	3	4	5	6	7	8
1	λ_1	λ_2	λ_8	λ_3	λ_7	λ_4	λ_6	λ_5
2	λ_2	λ_3	λ_1	λ_4	λ_8	λ_5	λ_7	λ_6
3	λ_8	λ_1	λ_7	λ_2	λ_6	λ_3	λ_5	λ_4
4	λ_3	λ_4	λ_2	λ_5	λ_1	λ_6	λ_8	λ_7
5	λ_7	λ_8	λ_6	λ_1	λ_5	λ_2	λ_4	λ_3
6	λ_4	λ_5	λ_3	λ_6	λ_2	λ_7	λ_1	λ_8
7	λ_6	λ_7	λ_5	λ_8	λ_4	λ_1	λ_3	λ_2
8	λ_5	λ_6	λ_4	λ_7	λ_3	λ_8	λ_2	λ_1

1.6 nm 채널 파장을 적용한 광도파로열의 경로 차이값들($\Delta L_{1n}^{i,j}$)이 수렴하기 위한 허용 오차 범위를 $\epsilon = 10^{-2} \mu\text{m}$ 로 설정하였으며 이러한 허용 오차는 중심 채널 파장(1.55 μm)에서 광도파로열에 광파의 위상 오차가 $\pm 1.2^\circ$ 이내임을 의미한다. 4장의 전산 모의 실험에서 고려한 단위 도파로의 경우를 가정할 때 계산된 광도파로열의 경로 차이는 표 5와 같다. 이 값들은 표 4의 채널 파장 배열을 만족하는 경로 차이 집합중 최단 경로 차이를 나타낸다.

표 5. 제안된 알고리즘을 이용하여 계산된 광도파로열의 경로차이

Table 5. Calculated path length differences using the proposed algorithm.

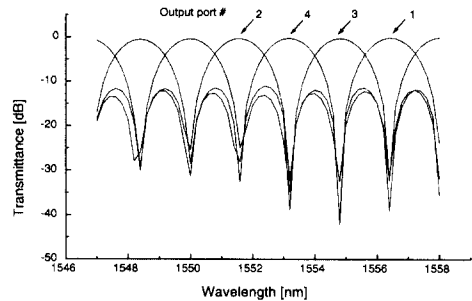
(a) 4x4 광도파로 격자 파장 라우터의 경로차
$\Delta L_{12} = 347.92 \mu\text{m}, \Delta L_{13} = 113.96 \mu\text{m},$ $\Delta L_{14} = 231.06 \mu\text{m}$
(b) 8x8 광도파로 격자 파장 라우터의 경로차
$\Delta L_{12} = 328.72 \mu\text{m}, \Delta L_{13} = 423.56 \mu\text{m},$ $\Delta L_{14} = 281.85 \mu\text{m}, \Delta L_{15} = 93.14 \mu\text{m},$ $\Delta L_{16} = 234.37 \mu\text{m}, \Delta L_{17} = 140.50 \mu\text{m}, \Delta L_{18} = 187.25 \mu\text{m}$

IV. 광도파로 격자 파장 라우터의 전산 모의 실험

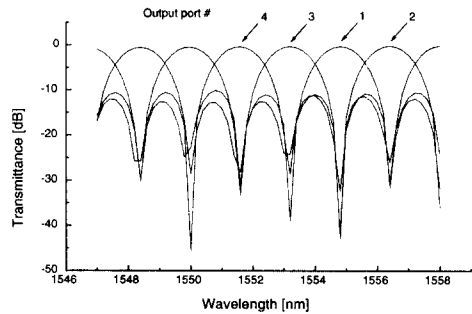
본 논문에서 고려된 단위 도파로의 횡단면 굴절률 분포는 InP기판에 0.35 μm -InGaAsP(1.2Q)의 코어층을 형성하고 다시 InP를 성장시켜 슬랩 도파로를 형성하고 측면적 구속력을 주기 위해서 위층의 InP를 0.2 μm 까지 식각을 시킨 ridge형 도파로이다. 이때 유효 굴절률법(effective index method)을 이용해 계산된 상대 유효 굴절률 차이(index contrast)는 0.5%이다.

유한 차분 빔전파 방법(Finite Difference Beam Propagation Method)을 이용하여 전산 모의 실험을 하였다^[8]. 저손실 특성을 가지며 파장 변화에 둔감하도록 다중모드 도파로의 길이가 835 μm 이고 다중모드 영역의 너비가 20 μm 인 4x4 다중모드 간섭결합기와 다중모드 도파로의 길이가 1667 μm 이고 다중모드 영역의 너비가 40 μm 인 8x8 다중모드 간섭결합기를 설계하였으며 설계된 다중모드 간섭결합기는 1550 nm의 파장에서 4x4의 경우에는 0.1 dB 이하의 잉여 손

실, 8x8의 경우에는 0.2 dB 이하의 잉여 손실을 유지하며 비교적 웨이퍼 면적을 효율적으로 사용할 수 있도록 잘 집적된 구조이다. 표 5에 제시된 광도파로열의 경로 차이와 설계된 다중모드 간섭결합기를 고려하여 전체적인 광도파로 격자 파장 라우터를 구성해 전산 모의 실험을 하였다.



(a)

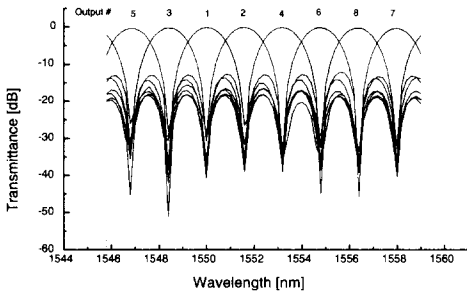


(b)

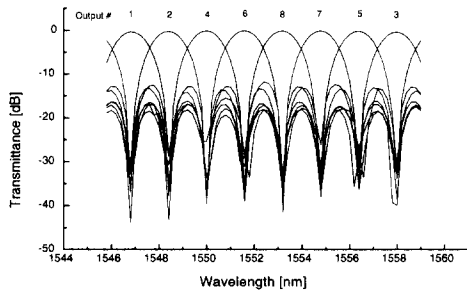
그림 4. 4x4 광도파로 격자 파장 라우터의 주파수 응답 (a) 1번째 입력 도파로를 여기시켰을 때, (b) 3번째 입력 도파로를 여기시켰을 때
Fig. 4 Spectral responses of 4x4 waveguide grating router (a) when the first input waveguide is excited and (b) when the 3rd input waveguide is excited.

그림 4와 그림 5는 각각 4x4 와 8x8 광도파로 격자 파장 라우터의 주파수 특성을 나타내었다. 각 채널 파장은 표 4에서 예상했던 것과 같이 정확히 1.6 nm (200 GHz)의 간격을 유지하며 각 채널 파장을 라우팅 한다. 주파수 특성을 살펴보면 4x4 광도파로 격자 파장 라우터의 경우는 모든 채널 파장들에서 0.3 dB 이하의 잉여 손실을 갖고 있으며, 8x8 광도파로 격자

파장 라우터의 경우는 0.4 dB 이하의 잉여 손실을 나타내고 있다. 그리고 누화는 두 경우 모두 -25 dB 이하를 유지하고 있다.



(a)



(b)

그림 5. 8x8 광도파로 격자 파장 라우터의 주파수 응답 (a) 1번째 입력도파로를 여기시켰을 때, (b) 5번째 입력 도파로를 여기시켰을 때
 Fig. 5. Spectral responses of 8x8 waveguide grating router (a) when the first input waveguide is excited and (b) when the 3rd input waveguide is excited.

표 6은 기존에 소개되었던 방사형 성형결합기를 이용한 경우와 본 논문에서 제시된 다중모드 간섭결합기를 이용한 광도파로 격자 파장 라우터의 특성을 비교하였다. 참고 문헌 [9] 과 [10] 의 성형결합기로 구성된 광도파로 격자 파장 라우터는 각각 silica와 InP 매질에서 2.5 dB 정도의 chip 내부의 잉여 손실을 갖고 있고 참고 문헌 [11] 에서 제작된 8x8 WGR 경우에는 2.4 dB의 chip내부 손실을 보인다. 반면, 본 논문에서 제안된 구조는 4x4 WGR 경우에는 0.3 dB, 8x8 WGR 경우에는 0.4 dB의 잉여 손실을 갖고 있어 저손실 특성이 우수함을 알수 있다.

표 6. 기존의 방사형 성형결합기로 구성된 광도파로 격자 파장 라우터와 제안된 다중모드 간섭결합기로 구성된 광도파로 격자 파장 라우터의 비교

Table 6. The Comparison between a conventional waveguide grating router and a proposed waveguide grating router.

	구성 소자	형태	매질	채널 간격	잉여 손실	누화
참고 문헌 [9]	성형 결합기	7x7	SiO ₂	3.3nm	<2.5dB (Chip내부)	<-25dB
참고 문헌 [10]	성형 결합기	5x5	InP	2.75nm	<2.5dB (Chip내부)	<-21dB
참고 문헌 [11]	성형 결합기	8x8	SiO ₂	15nm	<2.4dB (chip내부)	<-28dB
본 논문의 경우	다중모드 간섭결합기	4x4	InP	1.6nm	<0.3dB (Chip내부)	<-25dB
		8x8	InP	1.6nm	<0.4dB (Chip내부)	<-25dB

V. 결 론

본 논문에서는 NxN 다중모드 간섭결합기를 광도파로 격자 파장 라우터에 사용하는 구조를 제안하였으며 사용된 다중모드 간섭결합기는 저손실 특성을 가지며 파장 변화에 무관하도록 설계하였다. 또 광도파로열을 통과하는 광파들의 해석을 통해서 광도파로열의 경로 차이를 찾는 일반적 설계 지침을 마련하였으며 제안된 알고리즘을 사용하면 매우 효율적으로 경로차이를 구할 수 있음을 보였다.

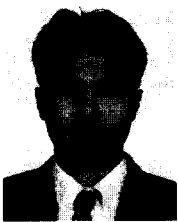
기존의 방사형 성형결합기가 광파의 회절을 이용함으로써 입출력단 갯수와 상관없이 고유한 방사손실을 갖고 있는 반면 제안된 구조는 잉여 손실을 최소화하여 광파의 효율적인 사용을 가능하게 하였다. BPM (Beam Propagation Method)을 이용한 전산 모의 실험 결과 제안된 광도파로 격자 파장 라우터의 주파수 특성은 표준화 움직임이 있는 1.6 nm (200 GHz) 파장 채널 간격에서 4x4 WGR 경우에는 0.3 dB 이하의 잉여 손실과 -25 dB 이하의 누화를, 8x8 WGR 경우에는 0.4 dB 이하의 잉여 손실과 -25 dB 이하의 누화를 갖는 우수한 구조임을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] C. Dragone, C. H. Henry, I. P. Kaminow,

- and R. C. Kistler, "Efficient Multichannel Integrated Optics Star Coupler on Silicon," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 8, pp. 241-243, 1989.
- [2] C. Dragone, "An NxN Optical Multiplexer Using a Planar Arrangement of Two Star Couplers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 9, pp. 812-815, 1991.
- [3] Lars Oddvars Lierstuen and Aasmund Sudbo, "8-channel Wavelength Division Multiplexer Based on Multimode Interference Couplers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 9, pp.1034-1036, 1995
- [4] Lucas B. Soldano and Eric C. M. Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Devices Based on self-imaging: Principles and Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 615-627, 1995.
- [5] M. Bachmann, P. A. Besse, and H. Melchior, "General Self-Imaging Properties in NxN Multimode Interference Couplers Including Phase Relations," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 18, pp. 3905-3911, 1994.
- [6] Donard L. Lee, *Electromagnetic Principles of Integrated Optics*, John Wiley & Sons, 1986.
- [7] 김 정 욱, 정 영 철 "깊이 시각된 다중모드 간섭 영역으로 구성된 광전력 분배기 및 결합기의 설계," *대한전자공학회논문지*, 제 34권, D편, 제 4호, pp. 62-72, 1997
- [8] Youngchul Chung and Nadir Dagli, "An Assessment of Finite Difference Beam Propagation Method," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 8, pp. 1335-1339, 1990.
- [9] C. Dragone, C. A. Edwards, and R. C. Kistler, "Integrated Optics NxN Multiplexer on Silicon," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 10, pp. 896-899, 1991,
- [10] 문 성 욱, 정 영 철 "성형결합기로 구성된 광도파로 격자 라우터의 설계 방법에 관한 연구," *한국통신학회논문지*, vol. 21, no. 9, pp. 2526-2532, 1996
- [11] K. Okamoto, K. Moriwaki, and S. Suzuki, "Fabrication of 64x64 Arrayed-waveguide Grating multiplexer on Silicon," *IEEE Electron. Lett.*, vol. 31, no. 3, pp. 185-186, 1995.

 저 자 소 개



文 盛 煜(正會員)

1991년 ~ 1995년 광운대학교 전자통신공학과(공학사). 1995년 ~ 1997년 광운대학교 전자통신공학과(공학석사). 1997년 ~ 현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정. 신기술연구소 연구원 및 한국전자통신연구원 위촉

연구원. 관심분야는 광소자 설계

鄭 榮 哲(正會員) 第 33 卷 A編 第 8 號 參照

현재 광운대학교 전자공학부/전자통신공학과 조교수 및 신기술연구소 연구원