

論文97-34D-4-9

깊이 식각된 다중모드 간섭 영역으로 구성된 광전력 분배기 및 결합기의 설계

(Design of Optical Power Splitters and Couplers Composed of Deeply Etched Multimode Interference Section)

金政郁*, 鄭榮哲*

(Jungwook Kim and Youngchul Chung)

요 약

본 논문에서는 다중모드간섭(MMI : Multimode Interference)을 이용한 GaAs/AlGaAs 광전력 분배기/결합기에 관해서 연구 하였다. 깊게 식각한 다중모드 도파로를 갖는 광전력 분배기/결합기의 설계를 제안하고, FD-BPM을 이용하여 성능과 식각깊이, 다중모드 도파로의 폭에서의 제작 허용오차를 전산모의하였다. 제안된 구조의 $1 \times N$ 광전력 분배기는 0.2dB의 잉여 방사손실과 균일도를 보였으며, 이것은 깊이 식각하지 않은 구조보다 0.7dB 작은 잉여 방사손실이다. 또한 잉여 방사손실을 0.5dB 이내로 하고자 할 때 깊이 식각한 다중모드 영역을 갖는 14 광전력 분배기의 다중모드 영역의 폭에 대한 제작상의 허용오차는 $0.6 \mu\text{m}$ 이다. 제안된 32×32 광전력 결합기의 잉여 방사손실과 균일도는 0.3dB 이하로 깊이 식각하지 않은 다중모드 영역의 구조보다 2dB 이상 작은 잉여 방사손실을 보였다. 깊이 식각한 MMI 영역의 광전력 분배기 및 결합기는 매우 낮은 손실과 우수한 균일도를 보이고 개선된 제작상의 허용오차를 나타냄을 확인하였다.

Abstract

The optical power splitter/couplers based on MMI(Multimode Interference) in GaAs/AlGaAs are studied. We present a design of optical power splitter/couplers, which have deeply etched multimode waveguide. The properties and fabrication tolerance on the etching depth, multimode waveguide width are simulated using a FD-BPM(Finite Difference Beam Propagation Method). Proposed $1 \times N$ optical power splitters exhibit excess loss of 0.2 dB and uniformity of 0.2dB. It is found that the excess loss of designed device is 0.7dB smaller than the optical power splitter with a shallowly etched MMI section. For 0.5dB excess loss, the predicted fabrication tolerance is $0.6 \mu\text{m}$ on the multimode waveguide width of the 14 optical power splitter with a deeply etched MMI section. Also excess loss and uniformity of proposed 32×32 optical power coupler are below 0.3dB. The excess loss of proposed 32×32 optical power coupler is 2dB smaller than the optical power coupler with a shallowly etched MMI section. It is shown that the optical power splitters/couplers with a deeply etched MMI section have low loss, good uniformity, and improved fabrication tolerance.

* 正會員, 光云大學校 電子通信工學科 新技術研究所
(Dept. of Electronic Communications Engineering,
School of Electronics Engineering The Institute
of New Technology, Kwangwoon University)
接受日字:1996年7月4日, 수정완료일:1997年4月8日

I. 서 론

현대의 통신 환경에서 전송 용량의 증가와 장거리화에 따라 광통신의 필요성이 증가하고 있으며 국간 통신 등에서 한파장 채널만을 사용하는 광통신망이 구축되어지고 있고 실제 사용되고 있다. 한편 데이터의 증

가에 따른 대용량의 정보를 고속으로 전송할 수 있는 초고속 정보 통신망에 대한 필요성과 관심이 증가 됨에 따라 앞으로의 통신 시스템은 고속망의 전송용량을 증가 시키기 위해서 신호를 서로 다른 파장에 실어 보내는 파장분할다중(WDM: Wavelength Division Multiplexing)방식의 광통신 시스템이 중요 기반이 될 것이다. 또한 초고속망의 실현을 위해 광가입자화(FITL: Fiber In The Loop)에 적합한 수동광네트워크(PON: Passive Optical Network)에서는 WDM 수동광소자를 이용한 MUX/DEMUX 소자가 요구된다^[1]. 이와 같은 대용량 광통신 시스템에서는 1×N 분배기 또는 N×N 결합기와 같이 광신호를 분기하거나 결합하는 광소자가 요구되며, 이러한 소자의 형태는 반복적 대량 생산에 적합한 광집적회로 형태가 매우 유망하다.

다중모드 도파로에서의 다중모드 간섭(MMI: Multimode Interference)효과를 이용한 수동 광소자는 제작의 용이성과 매우 작은 면적에 효율적으로 구현할 수 있는 등의 우수한 특성으로 최근 이에 대한 관심이 증가하고 있으며, 여러 형태의 소자에 응용되어 오고 있다^[2-4]. 특히 다중모드 간섭 효과를 이용한 광전력 분배기/결합기는 매우 유용한 광소자라 할 수 있으며 이와 관련된 설계 및 제작 기술의 확보가 중요하다.

본 논문에서는 다중모드 간섭 효과를 이용하여 광집적 형태의 광통신 소자로서 입사된 광신호를 출력 도파로로 균일하게 분기하는 1×N(N=4,8,16,32,64) 및 N×N(N=4,16,32) 광전력 분배기/결합기의 설계 및 성능분석에 관하여 논의한다. 깊이 식각한 MMI영역을 갖는 구조를 제안하고, 광전력 분배기/결합기의 출력 단에서 균일한 광전력을 얻기위한 적절한 입출력 도파로 구조의 설계와 함께 제작상의 오차에서 발생하는 도파로에서의 삽입손실 등을 최소화할 수 있는 최적의 설계 조건을 모색하였다

II. 다중모드 간섭효과

다중모드 간섭 소자는 다중모드 도파로 내에서의 self-imaging 이론에 근거를 두며, self-imaging은 광파의 전파방향으로 입사된 전계분포가 일정한 주기로 단일 또는 다중 형태로 재생되는 다중모드 도파로의 특성이다^{[5][6]}.

1. 다중모드 도파로에서의 모드

그림 1과 같이 y-z 평면상에 폭이 W이고 도파영

역의 유효굴절율이 n_{eff} 인 다중모드 도파로가 놓여 있을 경우 도파로내에 m개의 모드가 존재할 때 각 모드들의 전파상수 β_v 는

$$\beta_v = k_0 n_{eff} - \frac{(v+1)^2 \pi \lambda_0}{4 n_{eff} W^2} \quad (1)$$

와 같이 근사적으로 쓸 수 있다^{[6][7]}. 여기서 n은 모드 번호로 $n = 0, 1, \dots, (m-1)$ 이고, λ_0 는 자유공간에서의 빛의 파장이다.

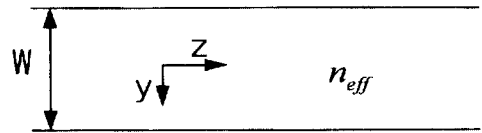


그림 1. y-z 평면상의 다중모드 도파로
Fig. 1. Multimode waveguide on the y-z plane.

모드 전파상수의 식으로부터 기본모드와 1차모드의 beat length L_π 는 아래와 같이 된다^[6].

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4 n_{eff} W^2}{3 \lambda_0} \quad (2)$$

2. 다중모드 도파로에서의 self-imaging

다중모드 도파로에서의 전계분포는 각 모드의 함수 $\psi_v(y)$ 의 중첩으로 표현되며, $z=0$ 에서의 $\Psi(y, 0)$ 는 다중모드 도파로로 입사되는 빛의 입력 전계로 다음과 같다.

$$\Psi(y, 0) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) \quad (3)$$

여기서 c_v 는 도파로 내에서의 모드의 여기상태를 나타내는 계수로 모드간의 orthogonality 관계로부터 유도된다. $z=L$ 인 거리에서의 전계분포는

$$\Psi(y, L) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) \exp [j \frac{v(v+1)\pi}{3L_\pi} L] \quad (4)$$

와 같이 표현되며, 어느 특정한 거리에서 입력 전계분포가 재생됨을 알 수 있다^{[6][7]}.

3. 다중모드 간섭의 형태

다중모드 간섭효과의 형태는 모드의 여기조건이 없는 일반간섭(general interference)과 모드의 여기조건이 있는 제한간섭(restricted interference)으로 구분된다.

(1) 일반간섭

일반간섭에 의한 다중모드 도파로에서 이미지의 재생은 단일 또는 다중의 형태로 이루어지며, 이를 이용한 소자는 N×N의 형태가 된다.

① 단일 이미지

식 (4)에서 n(n+1) 은 항상 짝수이므로 $L = p(3L_\pi)$ $= p(\frac{4n_{eff}W^2}{\lambda_0})$ 인 위치에서 단일 이미지가 재생된다. 여기서 p=0, 1, 2,...로 이미지 재생의 주기성을 나타내며, p가 짝수(even)인 경우에 모드의 위상 변화는 2π 의 정수배로 상대적으로 동일한 위상을 갖는 모드의 단일 이미지가 재생되는 경우이다. 또한 p가 홀수(odd)인 경우에는 y=0에 대해서 대칭인 이미지(mirrored image)가 재생된다.

② 다중 이미지

도파로내의 모드함수를

$$\Psi_v(y) = \sin [\frac{(v+1)\pi}{W} y] \quad (5)$$

와 같이 정현함수로 근사시켰을 때 도파로내의 모드함수와 입력 전계의 함수 $\Psi(y, 0)$ 를 y축에 대해서 2W의 주기를 갖는 비대칭 함수로 확장하면 입력단에서의 전계는

$$\Psi_m(y) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} [\Psi(y-v2W, 0) - \Psi(-y+v2W, 0)] \quad (6)$$

로 쓸 수 있다^[7]. 식 (6)과 같이 주어진 입력 전계로부터 N개의 다중 이미지가 재생되는 거리는

$$L = \frac{p}{N} (3L_\pi) = \frac{p}{N} (\frac{4n_{eff}W^2}{\lambda_0}) \quad (7)$$

이고, p=1일때 최초의 N개의 이미지가 재생된다^[7].

(2) 제한간섭

모드의 여기조건에 따라 짝을 이루는 모드끼리의 간섭(paired interference)과 대칭간섭(symmetric interference)으로 구분된다.

① 짝을 이루는 모드끼리의 간섭

2, 5, 8...번째 모드가 여기되지 않을 때, 이미지가 재생되는 거리 L은 일반간섭인 경우보다 3배 줄어든다. 따라서 단일 이미지가 재생 되는 거리는

$$L = p(L_\pi) = p(\frac{4n_{eff}W^2}{3\lambda_0}) \quad (8)$$

이고, N개의 이미지가 재생되는 거리는

$$L = \frac{p}{N} (L_\pi) = \frac{p}{N} (\frac{4n_{eff}W^2}{3\lambda_0}) \quad (9)$$

이다^[7]. 위와같이 2, 5, 8...번째 모드를 여기시키지 않기 위해서는 입사되는 입력 전계 $\Psi(y, 0)$ 의 위치가 $y = \pm \frac{W}{6}$ 이어야 한다. 즉 입사광의 위치는 다중모드 도파로의 중심에서 $\pm \frac{W}{6}$ 만큼 떨어진 곳이 되며^[7], 입력단의 위치가 두 곳으로 제한되므로 이를 이용한 소자는 2N의 형태가 된다.

② 대칭간섭

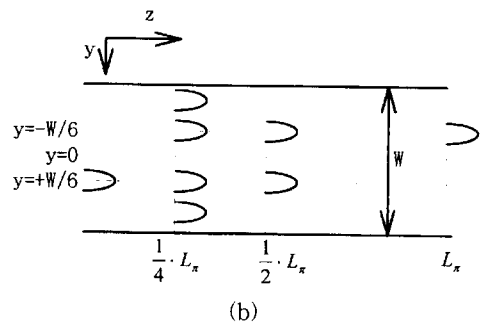
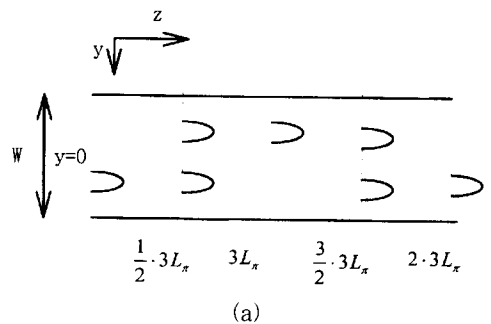
다중모드 도파로내에서 짝수번째 모드(even mode)만을 여기시키게 된다면 N개의 이미지가 재생되는 거리를 일반간섭인 경우보다 4배 줄일 수 있다. 단일 이미지가 재생되는 거리는

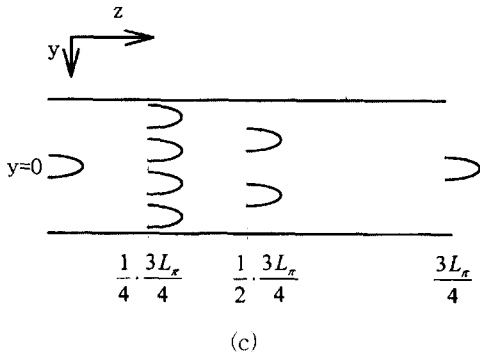
$$L = p(\frac{3L_\pi}{4}) = p(\frac{n_{eff}W^2}{\lambda_0}) \quad (10)$$

이 되고, N개의 이미지가 재생되는 거리는

$$L = \frac{p}{N} (\frac{3L_\pi}{4}) = \frac{p}{N} (\frac{n_{eff}W^2}{\lambda_0}) \quad (11)$$

이다^[7]. 위와 같은 모드 여기 조건을 만족하기 위해서는 입사되는 입력 전계의 위치가 다중모드 도파로폭의 중심이어야 한다. 따라서 대칭간섭을 이용한 소자는 1×N 형태가 된다. 그림 2에서 다중모드 도파로에서의 이미지의 재생을 나타냈다.





(c)

그림 2. 다중모드 도파로의 self-imaging (a)일반 간섭 (b)짝을 이루는 모드끼리의 간섭 (c) 대칭간섭

Fig. 2. Self-imaging in the multimode waveguide. (a)general interference (b)paired interference (c)symmetric interference

III. 광전력 분배기/결합기의 설계 및 전산모의 실험

1. 1×N 광전력 분배기

본 논문에서 설계한 광전력 분배기 및 결합기는 그림 3과 같은 GaAs/AlGaAs 기판을 이용하며, 1×N 광전력 분배기는 대칭간섭을 이용한 것으로 1개의 입력과 N개의 출력을 갖는다. 즉, 짝수번째 모드만을 여기시키기 위해 다중모드 도파로폭 중앙에 위치한 입력 단일모드 도파로와 등간격으로 배열된 N개의 출력 단일모드 도파로가 다중모드 도파로에 연결된 형태로 구성된다. [8] [9] [10]

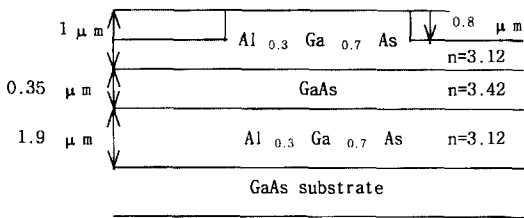


그림 3. 광전력 분배기/결합기의 단면 구성도

Fig. 3. Cross section of an optical power splitter/coupler.

출력단에서 첫번째 N개의 이미지가 재생되는 거리는 식 (11)로부터 $p=1$ 이므로 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$L = \frac{1}{N} \left(\frac{n_{eff} W^2}{\lambda_0} \right) \quad (12)$$

위와같은 설계공식으로 1×N 광전력 분배기의 구조를 설계하기 위해 입력력 단일모드 도파로 폭(w)과 도파로 중심간 거리(D)를 고려하여 $W=DN$ 인 다중모드 도파로의 폭(W)을 선택한후, 식 (12)로부터 다중모드 도파로의 길이(L)를 계산한다. 이렇게 결정된 다중모드 도파로의 폭과 길이는 출력단에서의 균일한 출력을 얻기 위한 최적화 과정이 필요하며 이는 광도파 구조의 설계에 유용한 FD-BPM(Finite Difference Beam Propagation Method) [11]을 이용하여 각각의 최적값을 찾을 수 있다. FD-BPM은 도파구조의 굴절을 분포가 정확히 알려진 경우 도파구조의 특성을 실제 상황과 거의 동일하게 해석할 수 있는 도구로서 잘 알려져 있다 [11]. 출력 광전력의 손실이 최소가 되는 출력 단일모드 도파로의 위치 선정은 각각의 출력 광전력이 최대인 위치가 출력 단일모드 도파로의 중심이 되게 한다. 그림 4는 출력 도파로의 수가 N=4인 1×N 광전력 분배기의 개요도이다.

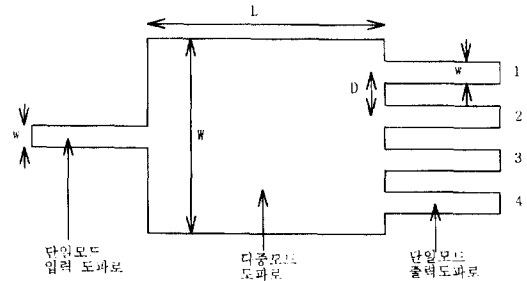


그림 4. 14 광전력 분배기의 개요도

Fig. 4. Schematic diagram of 14 splitter.

설계시 특히 중점을 둔 사항은 다중모드 도파로 바깥영역을 substrate까지 깊게 식각하여 다중모드 영역 바깥의 유효 굴절을 1이 되게 하였다. 이와 같은 구조에서는 모든 모드들의 광파위가 다중모드 도파로의 너비 W 내에 구속되기 때문에 self-imaging 이론의 근간인 모드합수 식 (5)와 전파상수 식 (1)에 거의 근접하는 모드 특성을 보이게 된다. 이에 따라 거의 완벽한 self-imaging을 발생하게 될 것으로 기대된다. 이를 통해 출력단에서 출력 균일도의 향상과 작은 삽입 손실, 향상된 제작상의 허용오차 등 전체적인 광전력 분배기의 성능 향상을 꾀하였다. 다중모드 도파로 바깥영역을 깊이 식각하지 않은 구조는 그림 5에, 다중모드 도파로 바깥영역을 깊이 식각한 구조는 그림 6에 각각 나타냈다.

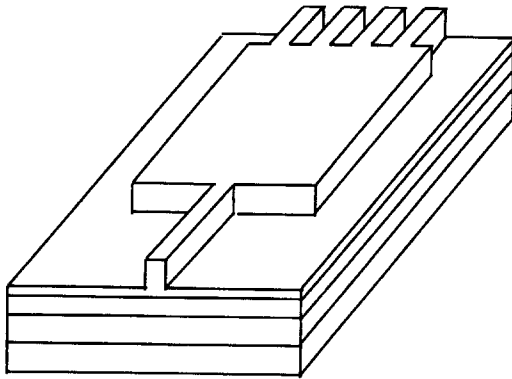


그림 5. 깊이 식각 하지 않은 다중모드 영역의 1×4 광전력 분배기
Fig. 5. 1×4 splitter without a deeply etched multimode section.

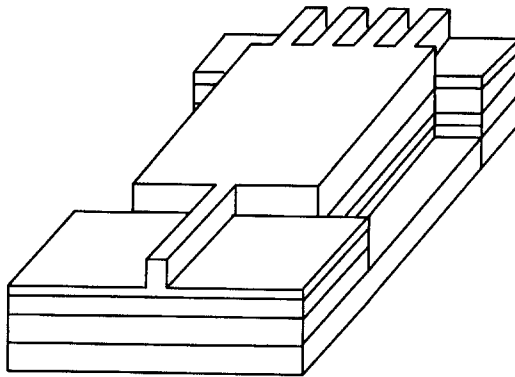


그림 6. 깊이 식각한 다중모드 영역의 1×4 광전력 분배기
Fig. 6. 1×4 splitter with a deeply etched multimode section.

표 1. 1×N 광전력 분배기의 설계 파라미터. L_d 는 깊이 식각한 경우 다중모드 영역의 길이이고, L_m 는 깊이 식각하지 않은 경우의 다중모드 영역의 길이이다.

Table 1. Design parameter of a 1×N splitter. L_d is the length of the deeply etched multimode region and L_m is the length of the shallowly etched multimode region.

	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64
$D[\mu\text{m}]$	11.25	11	11	11	11
$W[\mu\text{m}]$	45	88	176	352	704
$L_d[\mu\text{m}]$	1270	2420	4840	9680	19360
$L_m[\mu\text{m}]$	1420	2530	4940	9800	19500

입출력 단일모드 도파로는 단일모드 조건을 만족하도록 $0.8\mu\text{m}$ 식각되었으며, 폭은 $3\mu\text{m}$ 로 하였다. 본문에서 설계한 1×N 광전력 분배기의 설계 파라미터는 표1과 같다. 여기서 D 는 출력 도파로의 중심간 거리, W 는 다중모드 영역의 폭, L_d 는 깊이 식각한 다중모드 영역의 길이이며, L_m 은 깊이 식각하지 않은 다중모드영역의 길이를 나타낸다.

위와 같은 구조의 1×N 광전력 분배기의 성능을 확인 하기위하여 BPM 도구를 이용하여 전산 모의 실험을 하였다.

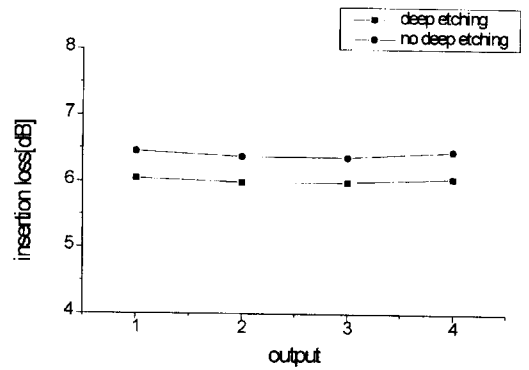


그림 7. 1×4 광전력 분배기의 삽입손실
Fig. 7. Insertion loss of a 1×4 splitter.

그림 7은 1×4 광전력 분배기에서 입력도파로로 광파를 입사하였을 경우 각 출력단에서의 삽입손실을 전산모의 실험한 결과를 나타내고 있다. 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각한 경우와 깊게 식각하지 않은 경우의 삽입손실을 비교하였다. 깊게 식각한 다중모드 영역의 구조인 경우 삽입손실은 깊게 식각하지 않은 경우 보다 약 0.4dB 낮은 삽입손실을 보였고 잉여 방사손실(excess loss)은 거의 0dB 였다.

그림 8은 다중모드 도파로 제작시 다중모드 도파로의 폭 변화에 따른 출력단에서의 삽입손실을 1×4 광전력 분배기의 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각한 경우에서 전산모의 실험한 결과이다.

그림에서와 같이 다중모드 도파로 폭이 $45 \pm 0.6\mu\text{m}$ 변화할 경우 삽입손실 증가량은 0.5dB이하가 되어 다중모드 도파로 폭 변화에 따른 제작상의 허용오차가 좋은 특성을 보였다. 그림에 보이지는 않았으나 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하지 않은 경우도 다중모드 도파로폭의 허용오차는 비슷한 것으로 나타났다.

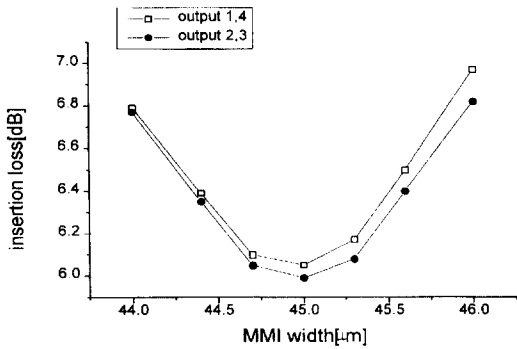
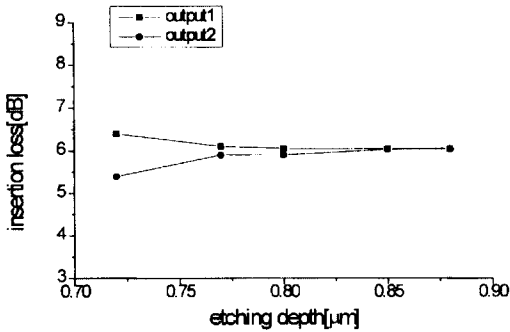
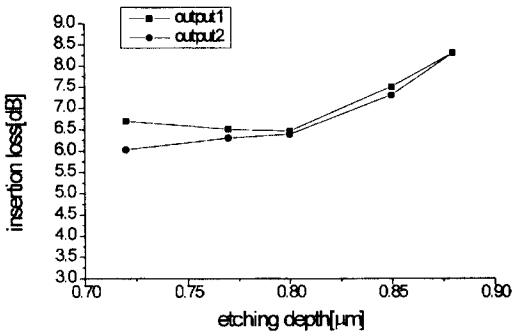


그림 8. 1×4 광전력 분배기의 다중모드 도파로 폭에 따른 삽입손실
 Fig. 8. Insertion loss versus the multimode waveguide width of a 1×4 splitter.



(a)



(b)

그림 9. 1×4 광전력 분배기에서 단일모드 도파로의 식각 깊이에 따른 삽입손실 (a)깊이 식각한 다중모드 영역인 경우, (b)깊이 식각하지 않은 다중모드 영역인 경우
 Fig. 9. Insertion loss versus the etching depth of the single-mode waveguide of a 1×4 splitter (a)with deeply etched multimode section, (b)with shallowly etched multimode section

그림 9는 입출력 단일모드 도파로 제작시 식각 깊이 변화에 따른 삽입손실의 변화를 1×4 광전력 분배기에서 전산모의 실험한 결과를 나타낸다. 본 논문에서 설계된 MMI 광전력 분배기/결합기의 입출력 단일모드 도파로폭은 도파영역과 도파영역 바깥의 유효굴절율차로부터 단일모드 조건을 만족하도록 계산된 것이다. 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각한 경우와 깊게 식각하지 않은 경우로 나누어서 입출력 단일모드 도파로 제작시 식각 깊이 변화에 따른 삽입손실의 변화를 비교하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각한 경우는 입출력 도파로의 식각 오차에 의한 삽입손실 증가가 거의 없는 반면에 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하지 않은 경우는 입출력 도파로의 식각 오차가 약 +0.1 μm 정도일때 삽입손실이 2dB 이상 증가됨을 알 수 있다.

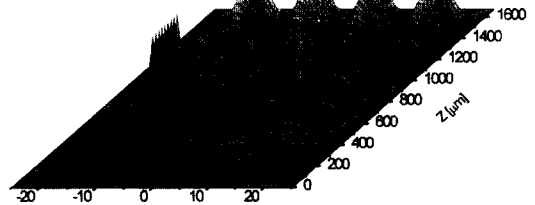
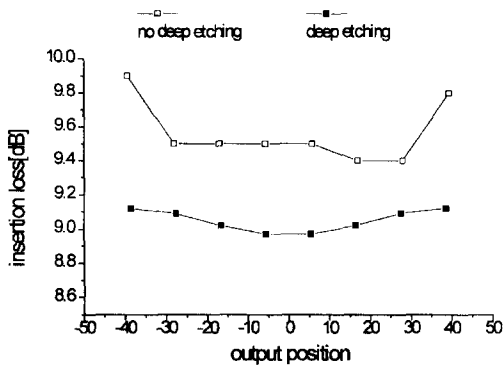


그림 10. 1×4 광전력 분배기의 BPM 시뮬레이션. 도파구조는 그림 4와 같고, 입출력 단일모드 도파로의 폭은 3 μm이고 길이는 200 μm 이다. 다중모드 도파로의 폭은 45 μm 이고 길이는 1270 μm 이다.
 Fig. 10. BPM simulation of a 1×4 splitter for the waveguide structure shown in Fig. 4. The width of the input and output waveguide is 3 μm and the length 200 μm. The width of the multimode waveguide is 45 μm and the length 1270 μm.

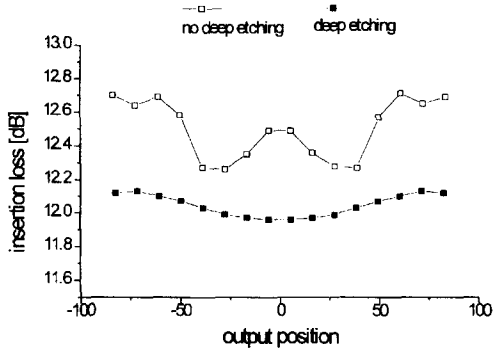
그림 10은 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각한 구조에서 입사된 광파의 도파상태를 BPM simulation 한 것이다. 입사 광파가 4개의 출력도파로로 균일하게 잘 분기되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 11은 1×N 광전력 분배기의 출력도파로의 수 (N)를 8,16,32,64 로 증가시켜서 각 출력단에서의 삽입손실을 전산모의 실험하여 깊이 식각한 다중모드 영역과 깊이 식각하지 않은 다중모드 영역을 비교한 것이고, 그림 12에서는 출력 광전력의 균일도를 보이고 있다. 깊이 식각한 경우 출력단의 수(N)가 증가하여도 삽

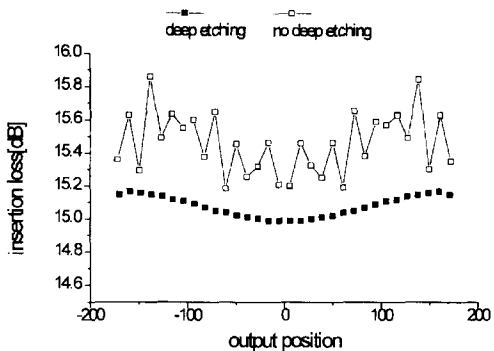
입손실은 거의 변화없이 일정한 반면에 깊이 식각하지 않은 경우 N이 64인 경우 0.5dB 이상 증가하였다. 또한 전체적인 출력 광전력의 손실은 깊이 식각한 경우 N을 64까지 늘렸을 경우에도 0.2dB 이하의 매우 낮은 손실과 우수한 균일도를 보였다. 그림12를 보면 다중모드 영역이 깊이 식각되지 않은 구조에서 N이 64정도로 증가되는 경우 균일도가 약 0.9dB 정도로 악화됨을 보이나, 다중모드영역이 깊이 식각된 구조는 균일도가 0.2dB로 매우 일정함을 알 수 있다.



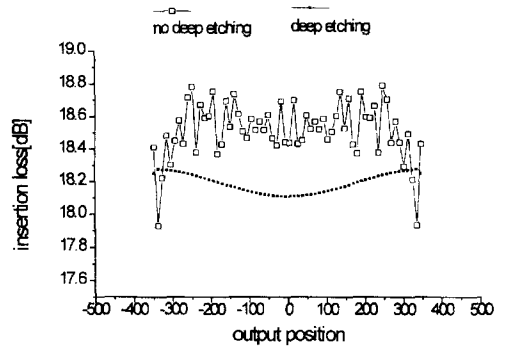
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 11. 1×N 광전력 분배기의 삽입손실 (a) 1×8 (b) 1×16 (c) 1×32 (d) 1×64

Fig. 11. Insertion loss of a 1N splitter (a) 1×8 (b) 1×16 (c) 1×32 (d) 1×64

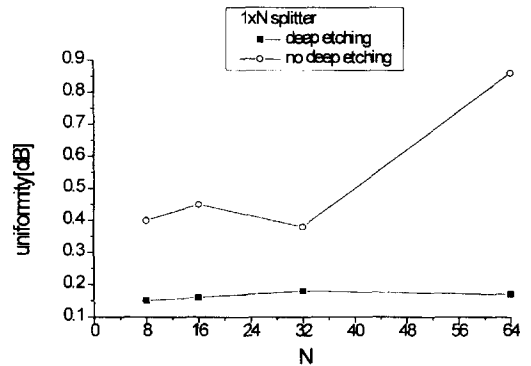


그림 12. 1×N 광전력 분배기의 출력 광전력 균일도
Fig. 12. Output power uniformity of a 1×N splitter.

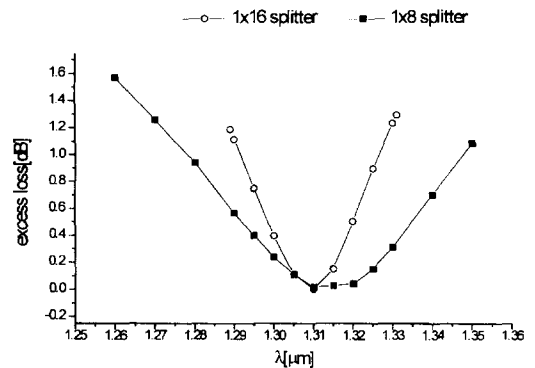


그림 13. 1×N 광전력 분배기의 파장응답
Fig. 13. Wavelength response of 1×N splitter.

그림 13은 1×8, 1×16 광전력 분배기에서 파장에 따른 출력단에서의 파장응답을 나타낸다. 0.2dB의 인

여 방사손실인 경우 18 광전력 분배기는 1.3~1.325 μ m의 파장으로 25nm의 대역폭을 갖고, 116 광전력 분배기는 1.304~1.315 μ m로 11nm의 대역폭을 갖는다. 0.5dB의 잉여 방사손실일 때는 18인 경우에는 1.292~1.335 μ m로 43nm의 대역폭, 116인 경우에는 1.298~1.32 μ m로 22nm의 대역폭을 나타낸다.

2. NN 광전력 결합기

일반간섭에서 다중 이미지가 재생되는 경우로 N개의 단일모드 입력도파로와 N개의 단일모드 출력도파로가 다중모드 도파로에 연결된 형태의 구조다¹⁷⁾. 각각의 입출력 단일모드 도파로는 등간격으로 배열되도록 설계하였으며, 출력단에서 첫번째 N개의 이미지가 재생되는 거리는 식 (8)에서 p=1인 경우로 다음과 같다.

$$L = \frac{1}{N} \left(\frac{4n_{eff}W^2}{\lambda_0} \right) \quad (13)$$

그림 14에서는 입출력 도파로의 수가 N=4인 N×N 광전력 결합기의 개요도를 보이고 있다.

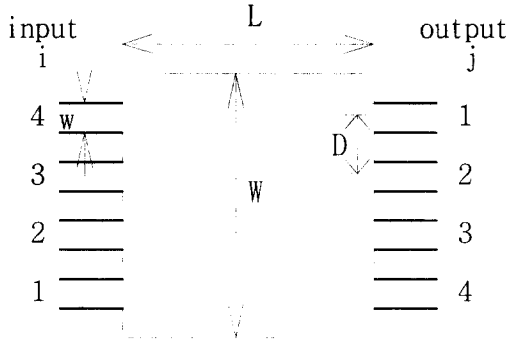


그림 14. 4x4 광전력 결합기의 개요도
Fig. 14. Schematic diagram of a 4x4 coupler.

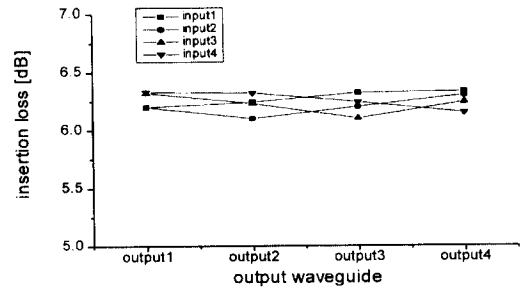
N×N 광전력 결합기의 설계에 있어서도 1×N 광전력 분배기의 설계 과정과 같이 입출력 단일모드 도파로의 폭(w)과 도파로의 중심간 거리(D)를 고려하여 다중모드 도파로의 폭(W)을 선택한 후 식 (13)에 주어진 바와 같이 다중모드 도파로의 길이를 선정하게 된다. 이렇게 결정된 다중모드 도파로의 폭과 길이는 광전력 분배기와 마찬가지로 균일한 광전력 분기를 위한 최적화 과정이 요구되며 이는 FD-BPM을 이용하여 최적의 다중모드 도파로의 폭(W)과 길이(L)를 선택한다. 본 광전력 결합기의 설계시 중점사항 또한 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하는 데 있다.

입출력 단일모드 도파로의 폭은 3 μ m이고 NN 광전력 결합기의 설계 파라미터는 표 2와 같다. W는 다중모드 영역의 폭, D는 입출력 도파로의 중심간 거리, L_d는 깊이 식각한 다중모드 영역의 길이이며, L_n은 깊이 식각하지 않은 다중모드영역의 길이이다.

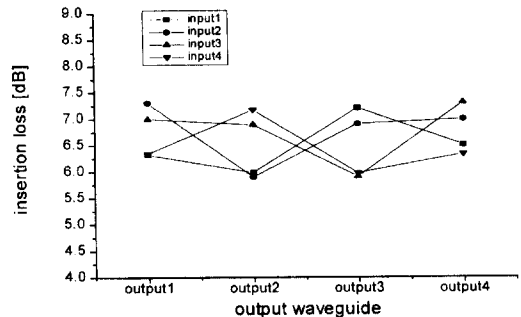
표 2. N×N 광전력 결합기의 설계 파라미터. L_d는 깊이 식각한 경우 다중모드 영역의 길이이고, L_n는 깊이 식각하지 않은 경우의 다중모드 영역의 길이이다.

Table 2. Design parameter of a N×N coupler. L_d is the length of the deeply etched multimode region and L_n is the length of the shallowly etched multimode region.

	4x4	16x16	32x32
D[μ m]	10	11	11
W[μ m]	40	176	352
L _d [μ m]	4000	19360	38710
L _n [μ m]	4510	19900	39300



(a)



(b)

그림 15. 4x4 광전력 결합기의 삽입손실 (a)깊이 식각한 다중모드 영역인 경우, (b)깊이 식각하지 않은 다중모드 영역인 경우

Fig. 15. Insertion loss of a 4x4 coupler. (a) with deeply etched multimod, (b) with shallowly etched multimode section.

그림 15는 4×4 광전력 결합기에서 광파가 다중모드 도파로로 입사된 경우 각 출력단에서의 삽입손실을 전산모의 실험한 결과이다. 이 경우 비교대상은 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하였을 경우와 깊게 식각하지 않은 경우가 된다. 그림에서 보듯이 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하였을 경우 각 출력단에서의 잉여 삽입손실이 0.3dB 이내인 반면 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하지 않은 경우 각 출력단에서의 잉여 삽입손실은 1.5dB 이내이고 각 출력단간의 균일도가 매우 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 깊이 식각한 다중모드 영역의 구조에서는 여기되는 입력 도파로에 관계없이 동일한 위치에서 각각의 출력이 최대로 나타나 출력도파로의 설계에 있어서 매우 용이하였다.

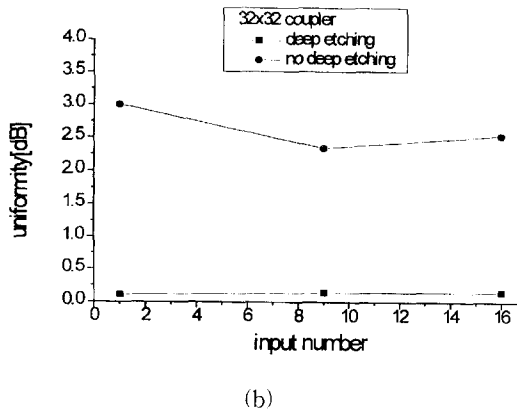
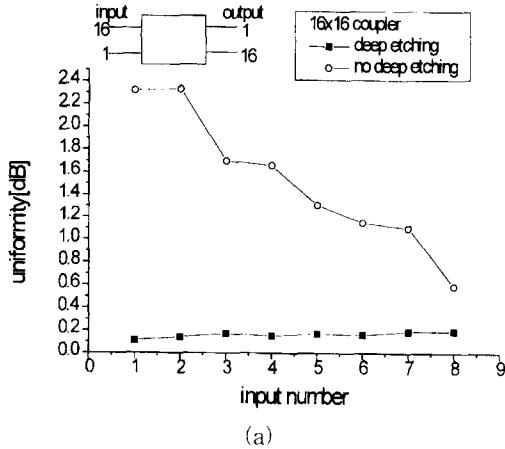


그림 16. $N \times N$ 광전력 결합기의 출력 균일도(a) 16×16 (b) 32×32

Fig. 16. Output power uniformity if a $N \times N$ coupler (a) 16×16 (b) 32×32 .

$N \times N$ 광전력 결합기에서 N 이 16,32일때 입력 도파

로의 위치에 따른 출력 균일도(Uniformity)를 그림 16에 보였다. 다중모드영역을 깊이 식각한 경우 전체 출력 광전력의 잉여 방사손실은 여기되는 입력도파로에 관계없이 0.2dB 이내로 매우 고른 반면에 깊이 식각하지 않은 경우에는 여기되는 입력도파로의 위치에 따라서 출력 광전력의 잉여 방사손실이 $N=16$ 일때 0.5dB ~ 2.4dB, $N=32$ 일때 2.3dB ~ 3dB로 N 이 클수록 불균일한 것으로 나타나 $N \times N$ 광전력 결합기의 경우 입출력단의 수가 많을 때 깊게 식각한 다중모드 영역의 구조가 매우 안정된 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 17은 16×16 광전력 결합기에서 BPM simulation을 통해서 최외곽 입력도파로로 여기된 광파의 도파상태를 나타낸 것으로 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각한 경우이다. 입사된 광파가 16개의 출력도파로로 잘 분기됨을 볼 수 있다.

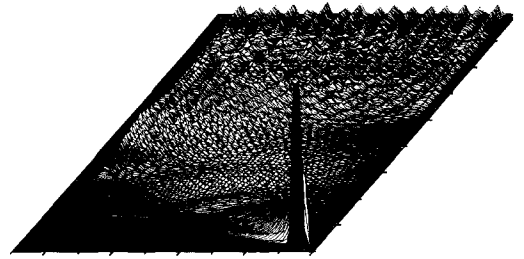


그림 17. 16×16 광전력 결합기의 BPM 시뮬레이션. 도파구조는 그림 14와 같은 형태이나 입출력단수의 갯수가 각각 16개인 경우이다. 입출력 단일모드 도파로의 폭은 $3 \mu\text{m}$ 이고 길이는 $200 \mu\text{m}$ 이다. 다중모드 도파로의 폭은 $176 \mu\text{m}$ 이고 길이는 $19360 \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 17. BPM simulation of a 16×16 coupler for the waveguide structure shown in Fig. 14 with the number of input and output waveguides 16. The width of the input and output waveguide is $3 \mu\text{m}$ and the length $200 \mu\text{m}$. The width of the multimode waveguide is $176 \mu\text{m}$ and the length $19360 \mu\text{m}$.

IV. 결론

본 논문에서는 다중모드 간섭 효과를 이용한 $1 \times N$ 광전력 분배기 및 $N \times N$ 광전력 결합기를 설계하고 BPM 도구를 사용한 전산모의 실험을 통하여 설계된 광전력 분배기/결합기를 최적화하고 그 성능을 평가

하였다.

다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하여 유효굴절율이 1이 되게 하는 구조를 갖도록 설계하여 보다 향상된 광전력 분배기/결합기의 성능을 얻고자 하였으며, 전산모의 실험을 통해 이를 확인 하였다. 1×4 광전력 분배기의 경우 다중모드 도파로 바깥영역을 깊게 식각하여 거의 0.1dB이내의 잉여 삽입손실을 가지며 매우 균일한 광전력의 분기를 얻었고, 다중모드 도파로의 폭이 $\pm 0.6\mu\text{m}$ 변화할 때 삽입손실 증가가 0.5dB이내로 제작시 다중모드 도파로의 폭 변화에 따른 제작상의 허용오차가 우수함을 보였다. 단일모드 입력 출력 도파로 제작시 식각 깊이의 변화에 따른 삽입손실 변화폭도 매우 적었다. 출력도파로의 수를 8에서 64까지 증가 시켰을 때 깊이 식각한 다중모드 영역의 구조에서 출력 광전력의 손실은 0.2dB이내이고 우수한 균일도를 보여 출력도파로의 수가 많은 경우 깊이 식각한 다중모드 영역이 매우 유리함을 보였다.

또한 NxN 광전력 결합기의 경우 다중모드 도파로 바깥영역이 깊이 식각된 구조는 N을 증가하여도 잉여 삽입손실은 약 0.3dB 이내의 균일도를 보인 반면 깊이 식각하지 않은 구조는 잉여 삽입손실이 4×4일때 최대 2dB, 16×16, 32×32인 경우 최대 3dB가 발생하는 등 매우 불균일 하여 N이 클 수록 손실이 증가하고 균일도가 감소하였다.

추후 과제는 이상의 전산모의 실험을 통해 얻은 향상된 성능의 광전력 분배기/결합기의 구조를 실제 제작을 통해서 확인하고, 이를 이용한 WDM 소자, 스위치, 변조기등의 다양한 소자를 설계하고 구현하는 것이다.

감사의 글

※ 본 논문은 한국 과학재단의 핵심전문연구(951-0916-013-2) 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- [1] Denis J. G. Mestdagh, *Fundamentals of Multiaccess Optical Fiber Networks*, ARTECH HOUSE, Boston, London, p.175, 1995.
- [2] R. M. Jenkins, J. M. Heaton, D. R. Wight, J. T. Parker, J. C. H. Birbeck, G. W. Smit, and K. P. Hilton, "Novel 1xN and NxN integrated optical switches using self-imaging multimode GaAs/AlGaAs waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no.6, pp. 684-686, 1994.
- [3] E. C. M. Pennings, R. J. Deri, R. Bhat, T. R. Hayes, and N. C. Andreadakis, "Ultracompact, all-passive optical 90-hybrid on InP using self-imaging," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 5, pp. 701-703, 1993.
- [4] E. C. M. Pennings, R. J. Deri, A. Schere, R. Bhat, T. R. Hayes, and C. Andreadakis, M. K. Smit, and R. J. Hawkins, "Ultracompact, low loss directional couplers on InP based on self-imaging by multimode interference," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 16, pp.1926-1928, 1991.
- [5] R. Ulrich and G. Ankele, "Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 27, no. 6, pp. 337-339, 1975.
- [6] L. B. Soldano, E. 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.
- [7] M. Bachmann, P. A. Besse, and H. Melchoir, "General self-imaging properties in NxN multimode interference couplers including phase relations," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 18, pp. 3905-3911, 1994.
- [8] A. Ferreras, F. Rodriguez, E. Gomez-Salas, J. L. de Miguel, and F. Hernandez-Gil, "Design and fabrication of an InP/InGaAsP multimode power splitter," *Integrated Photonics Research*, vol. 10, IME4-1, pp. 151-154, 1993.
- [9] J. M. Heaton, R. M. Jenkins, D. R. Wight, J. T. Parker, J. C. H. Birbeck, and K.P. Hilton, "Novel 1-to-N way integrated optical beam splitters using symmetric mode mixing in GaAs/AlGaAs multimodes waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 15, pp. 1754-1756, 1992.
- [10] T. J. Tayag, D. M. Mackie, and G. W. Bryant, "A manufacturable technique for implementing low loss self-imaging wa-

veguide beamsplitters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 8, pp. 896-898, 1995.

finite difference beam propagation method," *IEEE J. of Quantum Electron.* vol. 26, no. 8, pp. 1335-1339, 1990.

[11] Y. Chung and N. Dagli, "An assessment of

저 자 소 개



金 政 郁(正會員)

1990년 ~ 1994년 광운대학교 전자통신공학과(공학사). 1994년 ~ 1996년 광운대학교 전자통신공학과(공학석사). 1996년 ~ 현재 LG정보통신전송연구단 광/위성 통신설 연구원. 관심분야는 광즉폭기 및 광통신 시스템

템

鄭 榮 哲(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照

현재 광운대학교 전자공학부/전자통신공학과 조교수 신기술연구소 연구원