

論文98-35D-9-13

분포결합 수직광결합기 집적을 이용한 협대역 4채널 파장역다중기

(Narrowband four-channel wavelength demultiplexer using integrated distributed coupling vertical couplers)

韓 相 國 *

(Sang-Kook Han)

요 약

수직 방향성결합기 구조에서 결합파장 및 결합분포를 달리하는 결합기 4개를 포함하는 협대역 파장역다중기를 제안하고 동작특성을 모의실험 하였다. 너비가 다른 네 개의 ridge 광도파로를 동일한 strip상에 집적하여 수직결합시킴으로써 각각의 ridge 광도파로가 개별 파장역파기로 동작한다. 각 채널에서 발생하는 부엽(side-lobe)을 억제하기 위해 두 광도파로 간의 결합계수를 광파 진행방향으로 변화시켰다. 모의실험 결과 1.55 μm 중심파장 대역에서 채널간격은 7 nm 이고 각 채널은 1.7 nm의 3-dB 통과대역폭, 20dB의 부엽억제비 및 약 90%의 광전력 전달효율을 보이면서 각 채널이 균일한 광여과 응답특성을 나타냄을 알 수 있었다.

Abstract

A novel four-channel narrowband wavelength demultiplexer using integrated four vertical directional coupler structures is proposed and theoretically investigated. Four ridge waveguide with different ridge width are vertically coupled to a strip-loaded waveguide which results four different wavelengths filtered out to each ridge waveguide. In order to reduce the side-lobes, the coupling coefficients are varied along the propagation direction. The spectral responses of channels were found to be quite uniform. An average channel spacing of 7 nm with power coupling efficiency of ~ 90%, 3-dB passband width of 2 nm, and 20 dB side-lobe suppression ratio was achieved.

I. 서 론

대용량 정보전달 수단에 대한 욕구가 증가하면서 여러 파장을 동시에 전송하는 파장분할다중(WDM) 방식을 이용한 광통신시스템 및 다파장 광네트워크등이 매우 중요한 연구분야로 자리잡고 있다. 효율적인

WDM시스템을 얻기 위해서는 기존의 시분할다중(TDM)방식의 시스템에 비해 추가의 핵심기술이 요구 되는데 여러파장을 필요에 의해 나누어 주거나 모이주는 파장다중 및 역다중 기능이다. 파장다중/역다중을 얻기 위해 광결합기구조^[1, 2], Mach-Zehnder간섭계 구조^[3] 및 위상배열 광도파로 구조^[4, 5] 등이 보고되었다. 동작특성으로는 파장밀도를 높이기 위한 좁은 채널 파장간격 및 좁은 통과대역폭, 채널의 누화를 최소화 하기 위한 부엽억제 등이 필수적이며, 실제시스템에 적용하기 위해서는 제작의 용이성 및 낮은 삽입 손실등이 동시에 요구되어진다. 특히 광결합기 구조의 파장역파기는 다른 두 개의 광도파로를 평면 또는 수

* 正會員, 延世大學教 機械·電子工學部

(School of Electrical and Mechanical Engineering, Yonsei University)

※ 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

接受日字:1998年2月9日, 수정완료일:1998年8月14日

직방향으로 일정한 결합크기로 배열하게 됨으로써 단일 파장여과기로는 유용하나 여러채널을 동시에 파장다중/역다중 하기위한 기능 확장성에서는 불리한 구조로 알려져 왔다.

본 논문에서는 기존에 알려진 수직방향성 결합기의 협대역 파장여과 특성을 확장응용하여 각기 다른 결합파장, 결합분포를 갖는 4개의 결합기를 평면으로 배열함으로써 각기 다른 파장을 여과하는 광결합기를 집적하게 되어 4 채널 협대역 파장역다중기능을 얻을 수 있음을 제안하고 모의실험을 통해 파장응답 특성을 조사하였다. 이를 통해 기존의 단일 채널로서의 광여과기의 한계를 극복하고 다른 광도파소자와의 연계를 통해 다양한 파장선택적 기능을 수행할 수 있게 된다. 동작원리는 너비가 다른 네 개의 ridge 광도파로를 동일한 strip-loaded(SL) 광도파로에 결합력을 달리하여 수직결합함으로써 각각의 ridge 광도파로가 다른 파장을 여과하게 된다. 각각의 채널에서 발생하는 부엽(side-lobe)을 억제하기 위해 결합기의 두 광도파로 간의 결합계수를 광파 진행방향으로 분포변화시켰다. 결합계수의 변화는 ridge 광도파로의 위치를 SL 광도파로의 중심에서 벗어나는 정도에 의해 변하게 된다. 광파진행방향으로 결합크기를 변화시킴으로서 일반적으로 방향성결합기 구조가 지나는 길이에 대한 특성에 민성을 각 채널에서 감소하게 된다. 2장에서는 개별소자로서 각 채널의 설계 및 주요 특성에 관하여 기술하고 3장에서는 파장역다중기의 설계 및 모의실험 결과를 보인다.

II. 개별소자 구조 및 특성

수직으로 결합된 방향성결합기 구조를 이용한 협대역 파장 여과기의 동작원리 및 특성은 잘 알려져 있다^[6]. 다채널 파장 역다중기를 설계하기에 앞서 개별 채널의 파장여과 응답특성을 살펴보았다. 사용된 재료는 화합물반도체로서 InP기판에 성장된 격자 정합된 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47-y}\text{Al}_y\text{As}$ 가 각각의 층에 사용되었고, Al의 성분을 변화함으로써 굴절율 변화를 얻게 된다. 각 층의 굴절률은 ridge영역, 하단의 strip-loaded(SL) 광도파로 그리고 두 광도파로 사이 및 결합영역의 순으로 작게 하여 비대칭 방향성결합기 구조를 형성한다(그림4 참조). 본 연구에서는 ridge 영역은 $y=0.10$, SL광도파로는 $y=0.20$, 나머지 결합영역 및 버퍼는

$y=0.30$ 으로 고정하였으며 이 때 사용된 각층의 굴절율은 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 각각 3.458, 3.369, 3.300 이다. Ridge 광도파로는 도파하는 모드가 강하게 도파(도파모드의 광구속성이 크다) 되는 반면에 SL광도파로는 약하게 도파(도파모드의 광구속성이 상대적으로 작다) 된다. 각각의 광도파로의 전파상수(유효굴절율)가 파장에 따라 변하게 되므로 특정 파장에서만 전파상수가 같게되어 광도파로 간에 에너지를 주고 받는 광결합(optical coupling)이 발생하고 나머지 파장에서는 전파상수의 차이에 의해 에너지 결합이 억제된다. 따라서 협대역 통과파장을 얻기 위해서는 두개의 광도파로의 비대칭성(asymmetry)을 최대로 함으로써 원하는 동작파장에서 벗어난 파장에서의 에너지 결합을 최대한 급격히 감소시키는 것이 중요하다. 따라서 각각의 광도파로의 전파상수의 분산(dispersion)의 정도를 광도파로의 너비 및 두께 조절을 통하여 ridge의 경우에는 매우 큰 분산을, SL광도파로의 경우에는 작은 분산정도를 갖게 함으로써 두 광도파로의 분산정도의 차이를 극대화 하는 노력이 필요하다.

각 채널간의 누화(crosstalk)을 최소화하기 위해서는 일반적으로 방향성결합기에서 발생하는 부엽을 억제하여야 한다. 부엽이 억제된 협대역 동작특성을 얻기 위해서는 기존의 상수결합(constant coupling)구조 보다는 광파 진행방향으로 결합크기가 달라지는 분포결합(distributed coupling) 구조가 유리하다. 고정된 결합을 갖는 방향성결합기의 경우 파장에 따른 광전력 결합의 주기적인 반복성에 의해 인근 파장에서 연속적으로 부엽들이 생긴다. 일반적으로 광파진행 방향으로 결합정도가 정현적으로 변화하는 분포결합은 방향성결합기 구조에서 부엽을 감소시키는 구조로 알려져 있고^[7], 일정한 길이의 분포결합후 느린결합(slow coupling)을 연결함으로써 두 광도파로 간의 광결합을 최대로 억제하여 주기적으로 발생하는 부엽을 억제하는 동시에 통과대역폭을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다^[8].

그림 1에 언급한 상수결합, 분포결합 및 복합결합의 세가지 결합형태를 나타낸다. 여기서 ridge 광도파로의 중심위치가 변함으로 발생하는 결합계수의 변화가 비선형적이므로, 선형적인 중심위치 변화로 반정현파 모양의 분포결합 형태를 얻을 수 있었다. 결합상수는 두 광도파로의 2차원 전계분포의 단면방향에서의 중첩적분(overlap integral)을 통해 구해진다. 광도파로간

의 결합상수를 구하기 위해 각 도파로의 모드굴절률과 이에 상응하는 전계분포를 파장의 함수로 구해야 하는데, ridge 광도파로의 경우 spectral index method^[9]가 사용되었고 SL 광도파로는 2차원 effective index method를 통하여 해석되었다. 1.55 μm 에서 너비가 3.0 μm 인 ridge 광도파로가 1.7 μm 의 결합간격을 갖는 경우 SL 중심으로 부터의 위치 변화에 따른 결합계수 K_{12} (ridge로부터 SL로의 굴절을 섭동으로 인한 SL로부터 ridge로의 광전력 결합) 변화를 그림 2에 보인다.

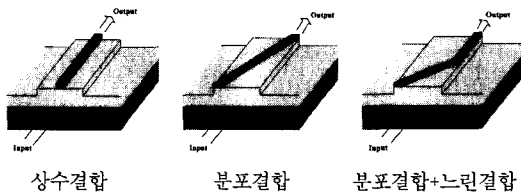


그림 1. 수직결합 분포의 세가지 형태
Fig. 1. Schematics of three different vertical coupling structures.

Marcatili의 모델^[10]을 이용하여 각각의 파장에서 SL로부터 ridge로의 광전력 전달특성을 구함으로써 일정한 결합크기를 갖는 경우와 분포결합을 할 경우의 여파기 응답특성을 비교한 결과 5 mm 길이의 분포결합을 갖는 경우 상수결합 구조에 비해 부엽 억제비가 9 dB에서 18 dB로 증가함을 알 수 있었다. 이 경우 공정한 비교를 위하여 각각의 파장응답에서 통과대역폭 및 최대 광전력 결합효율을 같게 유지하였다.

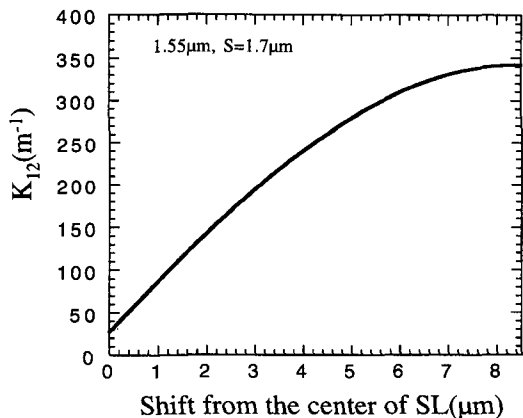


그림 2. ridge 광도파로의 위치에 대한 결합계수 변화 (ridge너비는 3.0 μm , 결합간격은 1.7 μm , 동작 파장은 1.55 μm)
Fig. 2. Coupling coefficient variation by lateral position change of ridge waveguide where the width of ridge is 3.0 μm , separation is 1.7 μm , and the operating wavelength is 1.55 μm .

분포 결합에 의해 부엽의 억제가 향상되었는데 계속하여 느린 결합 (그림1(c)참조)을 도입함으로써 부엽을 더욱 감소시키고 통과 대역폭을 좁게 할 수 있다. 5 mm의 분포결합후에, 수 mm정도 일정하게 최소의 결합 크기를 갖는 느린 결합구조를 사용하였다. 방향성 결합기 구조에서는 광전력의 결합이 주기적으로 반복되므로 균일한 동작특성을 갖는 파장 여파기로 사용하기 위해서는 소자길이에 따르는 동작특성의 예민성을 줄여야 한다. 따라서 특정 파장에서만 결합길이에 무관하게 두 개의 광도파로간에 광에너지를 상호 교환하고 나머지 파장에서는 결합길이에 따라 광전력이 두 개의 광도파로에 정현적으로 변화하여 분포하는 디지털 광스위치 기능을 제공함으로써 결합길이에 의한 예민성을 감소시킬 수 있다. 느린결합을 사용함으로써 5 mm 정도 분포결합을 통해 SL로부터 ridger 광도파로로 결합된 광전력이 더 이상의 결합을 억제당함으로써 ridge에서 SL으로의 반대결합(back coupling)이 감소하게 되어 특정파장에서 디지털 광스위치 기능을 얻게 된다. 더욱이 느린결합의 길이를 증가시킴으로써 부엽억제 효과 뿐만 아니라 통과 파장대역폭을 감소시키는데 예로서 그림 3에 느린결합길이의 변화에 따른 3-dB 통과대역폭의 변화를 나타낸다(이 경우 계산에 사용된 구조는 그림5의 1번 채널에 해당한다).

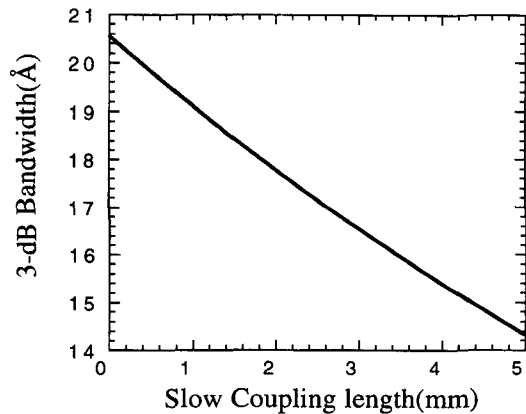


그림 3. 느린결합 길이의 변화에 대한 통과대역폭 변화
Fig. 3. Passband width variation as a function of slow coupling length.

느린결합길이가 길어짐에 따라 통과 대역폭이 좁아지게 됨을 알 수 있었다. 동시에 부엽억제비를 크게하기 위해서는 광도파로간의 적절한 결합간격을 유지함으로써 효과를 극대화하여야 하는데 일반적으로 결합기의

최대 광결합에 필요한 비트길이(bit length)가 분포결합 길이보다 길어야 하며, 이 때 결합력이 감소하면서, 즉 결합간격이 커지면서 유효적으로 비트길이가 늘어나게 되어 부엽억제비가 증가하게 된다. 반면에 비트 길이가 늘어남에 따라서 정해진 소자의 결합길이에 대해서는 광결합에 의한 최대 광전력 전달율이 감소하게 되므로 최적화된 결합간격이 구해져야 한다. 그림 4에 결합간격에 대한 부엽억제비와 광전달율의 변화를 보인다.

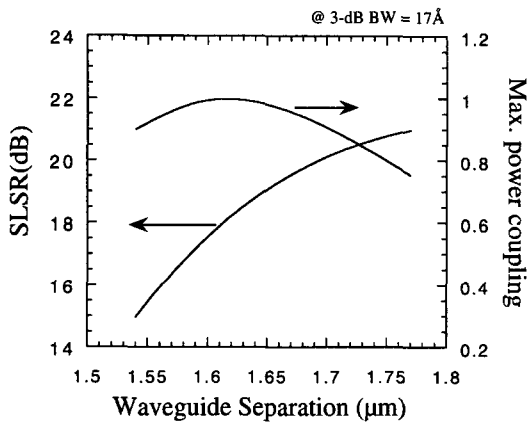
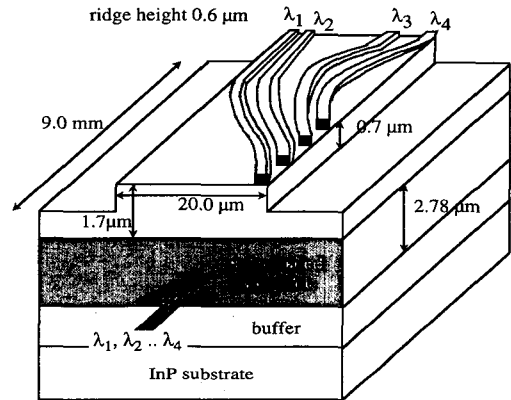


그림 4. 광도파로 결합간격에 대한 부엽억제비 및 최대 광전달율의 변화
 Fig. 4. Variations of SLSR(side-lobe suppression ratio) and maximum power coupling as a function of waveguide separation.

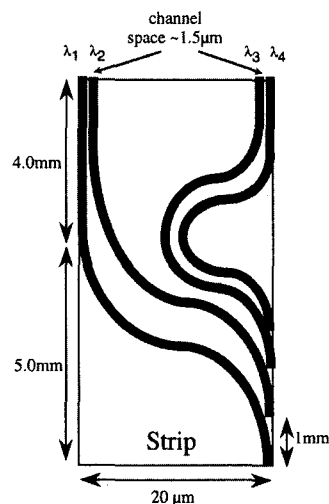
III. 다채널 파장역다중기 설계 및 모의실험

이상에서 살펴본 개별 채널의 파장여과 특성을 이용하여 여러 ridge채널을 단일 SL광도파로 상에 집적함으로써 다채널 파장 역다중기를 구현할 수 있다. 본 연구에서는 4개의 다른 너비를 갖는 ridge광도파로를 동일한 SL광도파로 위에 수직으로 배열함으로써 각 ridge 광도파로 마다 다른 파장에서 SL 광도파로와 위상정합하여 파장여과시 통과되는 중심파장이 달라지게 된다. 동시에 각 채널마다 앞에서 언급한 분포결합 및 느린결합을 병행하여 사용함으로써 부엽을 최대한 억제하고 좁은 통과대역폭을 얻을 수 있다. 그림 5에 제안된 네채널 파장 역다중기의 구조를 보인다. 각 ridge 및 SL광도파로는 단일모드로 동작하며 ridge 채널간의 간격은 최소 1.5 μm를 유지함으로써 근접한 ridge 광도파로 간의 측면 결합을 방지하였다. 각도파로의 곡선 형태는 방사손실을 고려하여 정현파 형태를

취하였고 길이(5mm)에 대한 측면 이동(약 17 μm)을 고려할 경우 충분히 느리게 변하는 곡선이므로 계산상 방사손실은 무시하였다. 만일 방사손실이 존재하더라도 급격한 광도파로 변화에 의한 모드변환이 없을 경우에는 살펴본 광결합은 유지되어 파장응답 특성에는 변화가 없고 단지 여다중된 각 채널의 광전력 전달효율이 줄어들게 된다. 결합간격은 부엽억제비와 최대 광전달율을 고려하여 1.7 μm로 고정하였다. ridge의 너비는 첫 번째 채널부터 3.4, 3.2, 2.8, 및 3.0 μm이며 모든 ridge는 0.6 μm의 동일한 높이를 갖는다.



(a)



(b)

그림 5. 제안된 4채널 파장 역다중기 구조 (a) 측면모양 (b) strip위의 모양
 Fig. 5. Schematics of the proposed four-channel wavelength demultiplexer; (a) side view (b) top view on strip.

SL 광도파로에 입사되는 광파가 TE 편광일 경우 각 채널별로 여파되는 광파의 파장에 대한 모드 분산곡선을 구하여 SL 광도파로의 도파모드와 위상정합되는 조건을 통해 예측하였다. 각 ridge 및 SL 광도파로의 모드굴절율을 1.5 μm 대역에서 파장의 함수로 계산하여 분산곡선을 얻은 후 교차하는 지점에 해당하는 파장이 각 채널의 여파 중심파장이 된다. ridge의 너비(W)가 2.8, 3.0, 3.2, 3.4 μm 일 경우 얻어진 중심파장은 각각 1542.7, 1550.7, 1557.1, 및 1563.3 nm로서 이웃 채널간 약 7 nm의 채널간격을 얻을 수 있었다(그림 6). 입사 편광이 TM 모드 일 경우에는 상대적으로 모드 굴절율이 감소하므로 위상정합되는 중심파장이 감소한다^[2].

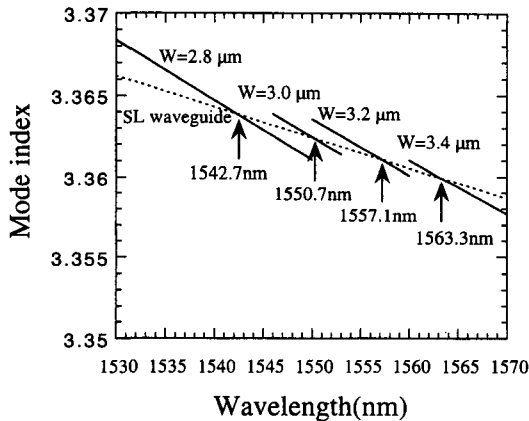


그림 6. 각 채널의 모드굴절율 분산곡선 (W는 ridge 광도파로의 너비)

Fig. 6. Mode index dispersions of four-channel waveguide where W corresponds to the width of ridge waveguides.

그림 5에서 볼 수 있듯이 4개의 채널을 strip위에 상호 결합없이 배열하기 위해서는 각 채널당 분포결합 및 느린결합의 배분에 약간의 변화를 주게 된다. 여기서 기억해야 할 점은 비록 결합크기의 분포가 다소 변화하더라도 여파되는 중심파장에는 변화가 없으며 이는 오로지 ridge의 너비에 의해서만 결정된다는 점이다. 따라서 결합크기의 분포변화는 결국 개별채널의 여파특성(통과대역폭, 부엽억제비, 최대 광전달율 등)에 영향을 주게 된다. 각 채널의 결합계수 분포를 그림 7에 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 모든 채널이 비슷한 형태의 분포결합을 약 5 mm동안 갖고, 두 번째 채널부터 느린결합의 길이가 감소한다. 이는 네 개

의 ridge를 동일한 strip상에 상호 겹치지 않고 최대한 비슷한 결합분포를 가지며 배치하는 과정에 기인한다. 이러한 문제점을 해소하기 위해서는 전체소자길이(결합길이)를 증가시키는 방법이 있는데, 동시에 발생하는 전파손실의 증가등을 고려해야 하므로 각 채널이 원하는 파장여파특성을 균일하게 갖는 범위내에서 실용적인 면을 고려하여 최소의 소자길이를 결정해야 한다.

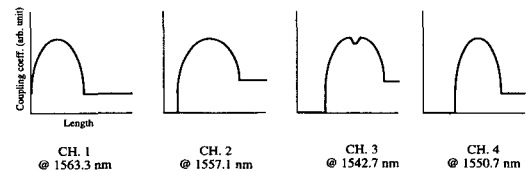


그림 7. 각 채널의 결합계수 분포 구조

Fig. 7. Schematic of coupling coefficient distributions of each channel.

여러파장의 TE모드 입사광이 SL광도파로에 입사될 때 각 ridge 채널로 결합되어 광전달되는 광결합특성을 modified coupled mode 이론^[11]과 Marcatilli의 특성방정식^[10]을 이용하여 1.5 μm 대역에서 파장의 함수로 계산하였다. 출력단에서 얻어진 파장 역다중기의 응답특성은 그림 8과 같다. 이웃 채널간 약 7 nm의 파장간격을 보이는데 이는 ridge 너비의 정밀한 조절에 의해 더욱 작게할 수 있다. 각 채널의 응답특성은 매우 균일하며 3-dB 통과대역폭은 약 1.7 nm, 부엽억제비는 약 20 dB, 그리고 최대 광전달율은 90% 정도였다. 자세한 채널별 응답특성은 표 1을 참조한다.

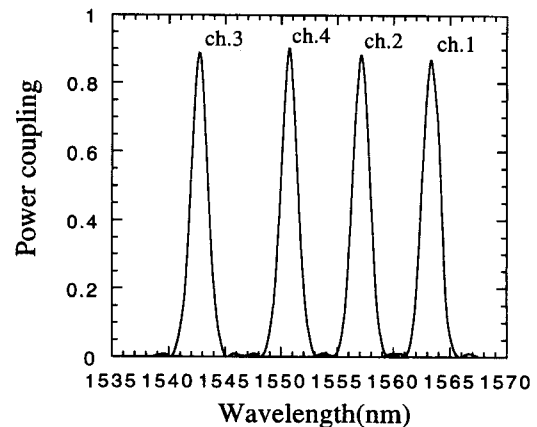


그림 8. 파장 역다중기의 응답특성

Fig. 8. Spectral response of the wavelength demultiplexer.

표 1. 파장 역다중기의 채널별 응답특성
Table 1. Channel characteristics of wavelength demultiplexer.

	중심파장 (nm)	3-dB 통과대역폭(nm)	부엽억제비 (dB)	최대광전달율
채널 1	1563.3	1.72	20.3	0.86
채널 2	1557.1	1.68	19.6	0.88
채널 3	1542.7	1.75	20.6	0.89
채널 4	1550.7	1.70	19.5	0.90

채널간의 파장간격은 7 nm로서 현재 사용되는 WDM 시스템에는 직접 적용이 어려우나 광도파로 구조변화(ridge의 폭의 차이를 줄이거나, buried구조 광도파로를 이용하여 도파로 높이를 조절한다.)를 통해서 각 채널의 mode index 차이를 작게함으로써 채널간의 파장간격을 더욱 줄일 수 있으며, 본 구조의 직렬 또는 병렬 연결을 통해 원하는 채널 수 및 파장간격을 얻어 시스템 적용이 가능하리라 생각한다. 또한 반도체 재료의 특성을 살려 carrier 주입 또는 Electro-Optic 효과등을 도입하여 결합기 위상정합 파장을 달리함으로써 여과 중심파장의 가변을 기대할 수 있다. 더욱이 본 소자는 구조가 간결하여 제작이 상대적으로 용이하며 반도체 광증폭기등의 다른 광소자들과의 집적이 용이하므로 효율적인 파장 선택적 시스템 구성에 유리할 것으로 여겨진다.

IV. 결 론

4개의 다른 ridge 광도파로를 동일 SL광도파로에 집적하여 각 ridge마다 다른 파장을 여과하는 4채널 부엽 억제된 협대역 파장 역다중기를 제안하고 모의실험을 통해 그 특성을 살펴보았다. 채널마다 두 광도파로 간에 분포결합 및 느린결합을 적절히 병합하여 사용함으로써 20 dB 이상의 부엽억제비 및 1.7 nm의 3-dB 통과대역폭을 보이는 균일한 채널특성을 얻을 수 있었다. 1.55 μm 파장대역에서 채널간 파장간격은 약 7 nm이고 채널당 광전력 전달율은 90%이다. 본 소자는 유사한 광도파로 구조의 광기능소자와 단일집적이 가능하므로 전광 평면 광회로(Planar lightwave circuits)구성에 유용하리라 생각한다.

참 고 문 헌

[1] R. Matz, et al., "Development of a

- photonic integrated transceiver chip for WDM transmission," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, p. 1327-1329, 1994.
- [2] S. K. Han, R. V. Ramaswamy, and R. F. Tavlykaev. "Narrowband vertically stacked filters in InGaAlAs/InP at 1.5 μm ," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, p. 77-83, 1996.
- [3] R. G. Walker, J. Urquhart, I. Bennion, and A. C. Carter, "1.3/1.53 μm Mach-Zehnder wavelength duplexers for integrated optoelectronic transceiver modules," *IEE Proc.*, vol. 137, Pt. J, p. 33-38, 1990.
- [4] R. Mestric, H. Bissessur, B. Martin, and A. Pinquier, "1.31-1.55 μm phased array demultiplexer on InP," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, p. 638-640, 1996.
- [5] R. Adar, C. H. Henry, C. Dragone, R. C. Kistler, and M. A. Milbrodt, "Broadband array multiplexers made with silica waveguides on silicon," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, p. 212-219, 1993.
- [6] R. C. Alferness and R. V. Schmidt, "Tunable optical waveguide directional coupler filter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, p. 161-163, 1978.
- [7] G. H. Song, "Proposal for an acoustic-optic filter with a near ideal band-pass spectrum," *Proc. of IPR'94*, p. 238-240, 1994.
- [8] S. K. Han, "Small side-lobe narrow passband wavelength filtering in distributed coupling vertical couplers," *Microwave and Optical Technol. Lett.*, vol. 17, p.178-181, 1998.
- [9] P. C. Kendall, P. W. A. Mcilroy, and M. S. Stern, "Spectral index method for rib waveguide analysis," *Electron. Lett.*, vol. 25, p. 107-108, 1989.
- [10] E. Marcatili, "Improved coupled-mode equations for dielectric guides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, p. 988-993, 1986.
- [11] S. L. Chuang, "A coupled mode formulation by reciprocity and a variational

principle," *J. Lightwave Technol.*, vol. 5, p. 5-15, 1987.

저 자 소 개

韓 相 國(正會員) 第 35卷 D編 第 5號 參照
연세대학교 기계·전자공학부 조교수