

# 방향성 결합기 구조의 파장가변 협대역 파장여과기

正會員 한 상 국\*

## Narrowband Tunable Wavelength Filters with Asymmetrical Directional Coupler Structure

Sang-Kook Han\* *Regular Member*

※본 연구는 96년도 연세대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음에 감사드립니다.

### 요 약

화합물 반도체를 이용한 비대칭 수직 방향성결합기 구조의 파장가변 협대역 파장여과기의 설계, 제작 및 동작 특성에 대하여 기술한다. 좁은 폭의 Ridge 광도파로와 넓은 폭을 갖는 Strip-loaded 광도파로를 수직방향으로 최대한 비대칭 광결합시켜  $1.55\mu\text{m}$  대역에서 통과중심파장을 갖도록 하였다. 설계에 있어서는 spectral index method, effective index method, coupled mode theory 등을 사용하여 최적 구조가 얻어졌으며 설계된 구조를 제작하고 동작특성을 측정하여 모의전산 결과와 비교하였다. 측정결과 여과 중심파장은  $1.537\mu\text{m}$ 이며 대역파장폭은  $1.8\text{nm}$ , 광전달효율은  $50\sim 70\%$ 로서 설계한 특성과 비교적 일치함을 볼 수 있었다. Carrier 주입을 통해 중심파장을 가변하였는데 수십 nm 이상의 가변특성은 쉽게 얻을 수 있었으나 넓은 가변파장대역을 갖기 위해서는 여과 파장대역 폭을 희생하여야 함을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

Wavelength tunable, narrowbandwidth wavelength filters in compound semiconductor have been modeled, fabricated, and characterized. In order to obtain a narrow bandpass characteristics at  $1.55\mu\text{m}$ , a highly asymmetrical directional coupler structure composed of a strongly guided ridge waveguide and a weakly guided strip-loaded waveguide was used. The optimized filter structure modeling has been obtained by using the spectral index method, effective index method, and the coupled mode theory. Operation at a center wavelength at  $1.537\mu\text{m}$  with a bandwidth of  $1.8\text{nm}$  and transfer efficiency of  $50\sim 70\%$  is experimentally achieved. For the purpose of center

\*연세대학교 전파공학과  
論文番號:97030-0122  
接受日字:1997年 1月 22日

wavelength tuning, the carrier injection in p-n diode structure has been theoretically investigated. It has been found that the tuning range of tens of nanometer can be easily obtained by a moderate amount carrier injection. We also found that the bandwidth becomes broad as the center wavelength tuning increases.

## I. 서론

최근에 10Gbit/s 이상의 초고속 광전송을 위한 기술로서 여러파장을 동시에 전송시키는 파장분할다중(WDM) 방식에 많은 관심이 모아지고 있다. 이를 구현하기 위해서는 다파장 광송신, 수신기능과 필요한 파장을 취사할 수 있는 파장선택 기술이 매우 중요하다. 또한 고밀도의 다채널 WDM 네트워크를 구현하기 위해 핵심이 되는 광부품은 좁은 통과대역 파장을 갖는 파장여과기로서 이들을 기본으로 하여 광상호연결기(optical crossconnect)가 구성되어 진다. 일반적으로 파장여과기가 갖추어야 할 특성으로서는 통과파장폭이 좁아야하며, 부모드(side mode)가 최대한 억제되어 최소의 채널 crosstalk을 가지며, 효율적인 WDM을 위해 통과파장의 가변성이 요구된다. 한편, 개별 소자로 사용되기 위해서는 편광특성에 의한 동작특성의 변화가 작아야 하며, 제작과장의 간편성도 실제의 시스템응용에 이점으로 작용한다.

본 논문에서는 화합물 반도체를 이용한 비대칭 수직 방향성결합기 구조의 파장가변 협대역 파장여과기의 설계, 제작 및 동작특성에 대하여 기술한다. 좁은 폭의 Ridge 광도파로와 넓은 폭을 갖는 Strip-loaded 광도파로를 수직방향으로 최대한 비대칭 광결합시켜 1.55 $\mu\text{m}$  부근에서 통과중심파장을 갖도록 하였다. 1.537 $\mu\text{m}$ 에서 1.8nm의 통과파장폭이 실험적으로 얻어졌으며 광전달효율은 50-70%이다. 본 파장여과기는 소자구조의 간결성 및 비교적 용이한 제작과정등이 실제 시스템응용에 장점으로 작용하며, 반도체 물질을 사용함으로써 carrier 주입등을 통해 수십 nm 이상의 가변 파장특성을 가지며 다른 광기능소자들과 단일집적도 기대할 수 있다.

## II. 동작원리 및 소자설계

두개의 광도파로가 결합되어 있는 구조의 파장여과기 동작 원리[1]는 방향성결합기의 특성에서 쉽게

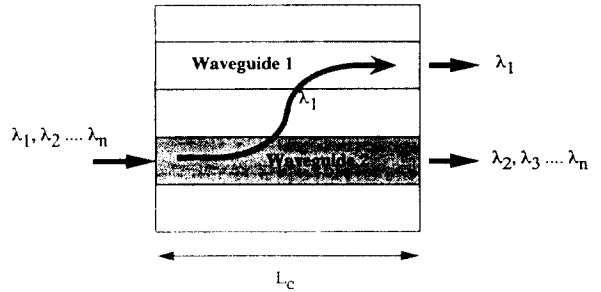


그림 1. 방향성 결합기구조 파장여과기의 동작원리.

Fig. 1 Principle of operation of directional coupler structure wavelength filter.

이해될 수 있으며 그림 1과 같이 표현된다. 두개의 광도파로가 특정 파장에서만 전파상수가 같게되어 상호간에 에너지를 주고 받는 결합(coupling)이 발생하고 나머지 파장에서는 전파상수의 차이에 의해 에너지 결합이 억제된다. 따라서 두개의 광도파로의 비대칭성(asymmetry)을 최대한 함으로서 동작파장에서 벗어난 파장에서 에너지 교환을 최대한 급격히 감소시키는 것이 협대역 통과파장을 얻기 위한 필요조건이다. 따라서 각각의 광도파로의 전파상수의 분산(dispersion)의 정도를 조절하여 ridge의 경우에는 매우 큰 분산을, strip-loaded의 경우에는 작은 분산정도를 갖게 함으로서 두 광도파로의 분산정도의 차이를 극대화 하는 노력이 필요하다. 이 때 여과 중심파장에서는 두 광도파로가 같은 전파상수를 갖는다. 파장여과기의 통과파장폭은 결합기 길이에 반비례하며 두 개의 광도파로의 전파상수 분산 차이에 정비례한다. 소자길이는 일반적으로 결합길이와 동일하게 하는데, 결합길이가 증가함에 따라 통과대역폭이 좁아지지만 실제 시스템에 사용하기 위해서는 소자길이가 적을수록 유리할 것이다. 따라서 결합길이의 변화보다는 전파상수 분산 값의 차이를 크게하기 위해 방향성결합기의 비대칭성 및 반도체 물질의 재료분산 특성 등을 적절히 이용한다. 좁은 통과대역폭을 얻기

위해 strong guiding되는 ridge waveguide와 weak guiding 하는 strip-loaded planar waveguide가 수직방향으로 결합하게 된다. Ridge waveguide의 분산곡선은 파장 변화에 대해 기울기가 크게 변하는데 반해 strip-loaded waveguide는 완만한 기울기 변화(실제로 strip-loaded waveguide의 waveguide dispersion은 거의 무시할 만큼 작다)를 가지므로 분산곡선의 기울기 차이를 극대화 할 수 있게 된다. 여기서 주목할 점은 광도파로 구조를 통한 waveguide dispersion의 변화를 얻음과 동시에 반도체 물질의 밴드갭을 적절히 조정하여 이용하므로써 밴드갭 근처에서 급격한 굴절률 변화를 보이는 material dispersion 효과도 좁은 대역폭을 얻는데 도움을 주게 된다.

소자설계의 목표는  $1.55\mu\text{m}$  근처파장에서 최대 광전력을 최소의 대역폭으로 여과하는 일이다. 이를 위하여 두 개의 개별 광도파로의 자체특성 및 상호 결합과정에서 발생하는 광전달특성을 살펴보아야 한다. 소자 모델링 과정은 다음과 같다. 먼저 좁은 ridge 구조의 광도파로의 파장에 따른 전파상수 및 2차원 전계분포를 구하기 위하여 비교적 빠르고 정확한 Spectral Index(SI) 방법<sup>[2]</sup>을 사용하였다. 한편 넓은 폭을 갖는 strip-loaded 광도파로의 경우에는 Effective Index 방법을 통하여 전파상수를 구하고 수직 및 수평방향의 전계분포는 변수를 분리하여 상대적으로 넓은 전계분포를 얻었다. 이 때 각각의 광도파로의 전계분포는 단면에서 2차원으로 단일모드가 되어야 한다. 각각의 광도파로의 특성이 구해지면 개선된 Coupled-mode 이론<sup>[3]</sup>을 사용하여 방향성 결합기 구조에서 두 광도파로간의 결합계수(coupling coefficient)를 계산한다. 결합계수는 두 광도파로가 인접함으로써 각각의 전계가 상호 섭동(perturbation)되는 양을 의미한다. 이 때 주목하여야 할 변수들로는 결합계수에 의하여 결정지어지는 결합길이(coupling length) 및 두 광도파로 사이의 거리에 따른 결합계수의 변화로서 소자의 필요한 실제길이 및 두 광도파로 사이의 결합층의 두께를 결정하는데 유효하게 사용된다. Marcattili<sup>[4]</sup>의 방법을 통하여, 초기에 모든 광에너지는 strip-loaded 광도파로에 입사하였다고 가정하고, 진행방향에 따른 두개의 광도파로상의 광전력 분포를 각각의 파장에 따라 계산한다.

주어진 소자길이에서 통과대역폭을 최소화하기 위

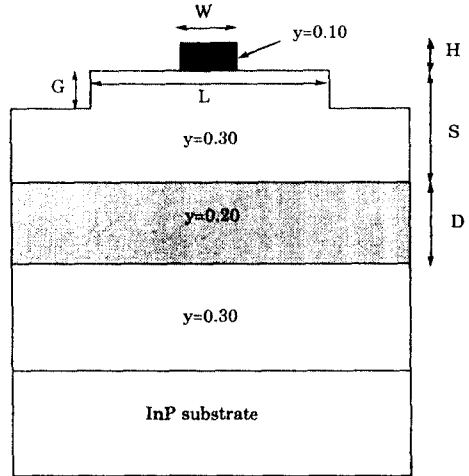


그림 2. 파장여과기의 단면구조로서 각층은  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47-y}\text{Al}_y\text{As}$ 로 구성되고 굴절률 변화를 위해 Al성분의 조성(y)을 변화 시켰다.

Fig. 2 Schematic of the filter where all the layers are  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47-y}\text{Al}_y\text{As}$  with different Al composition(y).

해 ridge waveguide의 분산은 최대로 하고, strip-loaded waveguide의 분산은 최소가 되도록 설계한다. 이 경우 두개의 분산곡선은  $1.55\mu\text{m}$ 에서 교차하여 위상이 같아진다. 사용하는 반도체 물질은 InP 기판에 성장된  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47-y}\text{Al}_y\text{As}$ 로서 InGaAsP를 대용할 수 있는 장파장용 화합물 반도체이다. Ridge waveguide의 분산을 크게하기 위해 InGaAlAs의 밴드갭을 동작파장에 근접하게 설정하였다. 그림 2는 설계하는 소자의 단면모양 및 각층의 Al 성분을 나타낸다. 최적구조를 얻기 위해 모의전산할 수 있는 변수는 각층의 두께, 폭 및 InGaAlAs의 조성성분변화(굴절률 및 밴드갭변화) 등이다. 대부분의 변수가 상호 연결되어 있기 때문에 일정한 동작파장과 소자길이를 유지하면서 여러변수를 동시에 모의전산하여 최적의 변수 값을 얻는 일은 매우 어려운 관계로, 개별변수들을 차례로 변화시키면서 이에 의한 소자의 동작특성변화 추이를 파악하여 다음의 최적구조를 구했다:  $H = 0.6\mu\text{m}$ ,  $W = 3.0\mu\text{m}$ ,  $D = 2.78\mu\text{m}$ ,  $L = 20.0\mu\text{m}$ ,  $G = 0.6\mu\text{m}$ .

그림 3은 언급한 구조의 ridge 및 strip-loaded waveguide의 모드굴절률 분산을 나타낸다.  $1.55\mu\text{m}$ 에서 두 곡선이 교차하며, 교차파장을 벗어나면 매우 큰 분산

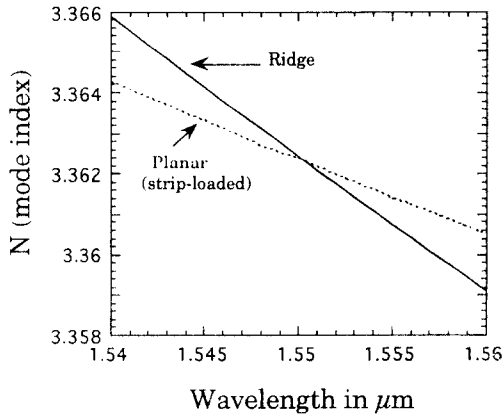


그림 3.  $3 \times 0.66\mu\text{m}$ 의 ridge waveguide와  $2.78\mu\text{m}$  두께의 strip-loaded waveguide의 모드 굴절률 분산곡선.  
Fig. 3 Variation of the mode index of  $3 \times 0.66\mu\text{m}$  ridge and  $2.78\mu\text{m}$  thick strip-loaded waveguide.

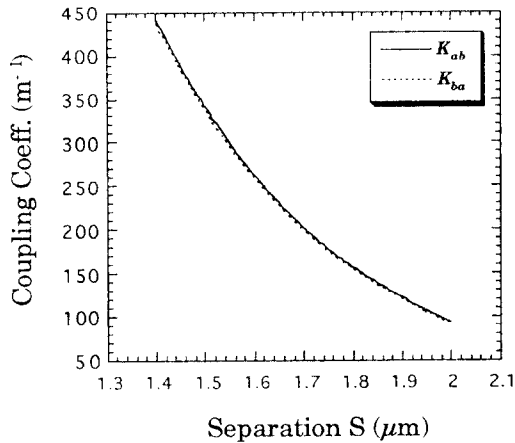


그림 4.  $1.55\mu\text{m}$ 의 파장에서 광도파로 사이 간격에 따른 결합계수의 변화.  
Fig. 4 Coupling coefficients variation at  $1.55\mu\text{m}$  as a function of separation between two waveguides.

값의 차이를 보임을 알 수 있었다. 다음은 ridge 및 strip-loaded waveguide의 2차원 전계분포를 구하고 각각을 정규화(normalization)하여 전계분포의 2차원 overlap 적분을 통해 결합계수를 구한다. 이 경우 ridge waveguide의 전계분포는 수학적표현이 아닌 수치값의 mesh로 얻어지므로 IMSL routine등을 이용하

여 전계값을 interpolation 하여야 한다. Strip-loaded waveguide의 경우에는 Effective index method를 통하여 두방향으로 cosine형태의 전계분포를 얻었다. 정규화된 두 개의 전계분포를 이용하여,  $1.55\mu\text{m}$ 의 파장에서 결합계수  $K_{ab}$ (strip-loaded에서 ridge waveguide로 결합) 및  $K_{ba}$ (ridge에서 strip-loaded로 결합)를 두 광도파로 사이간격 S의 변화에 대하여 계산한 결과가 그림 4에 보인다. 예상할 수 있듯이 결합계수  $K_{ab}$ ,  $K_{ba}$ 는 거의 비슷한 값을 갖으며, S가 커짐에 따라 지수적으로 감소함을 나타낸다. 소자길이는 결합길이(coupling length,  $L_c$ )에 의존하며,  $K_{ab}$ ,  $K_{ba}$ 에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$L_c \approx \frac{\pi}{2\sqrt{K_{ab} K_{ba}}} \quad (1)$$

광도파로 사이간격을  $S=1.5\mu\text{m}$ 로 하면  $L_c$ 는 4.6mm가 된다. 만일 S를 크게함으로써 증가된  $L_c$ 를 갖을 경우에는 결과적으로 대역폭이 줄어들게 되는데 모의 전산결과  $L_c$ 가 5mm 이상일 경우에는 S의 증가에 따른 대역폭의 감소율이 줄어들음을 볼 수 있었다.

광도파로 사이간격을  $1.50\mu\text{m}$ 로 고정하고 결합에 의한 광도파로간의 광전력 전달특성을 알아 본다. Marcatili의 접근식[6]을 사용하여 입력단에서 strip-loaded waveguide에 모든 광전력이 입사될 경우 ridge 및 strip-loaded waveguide의 광전력 분배량을 빛이 진행하는 방향을 따라 구하였다. 이 때 strip-loaded waveguide 내의 광전력( $P_s$ ) 및 ridge waveguide내의 광전력( $P_r$ )은 다음과 같이 표현된다.

$$P_s = 1 - \frac{1-c^2}{1+\delta^2} e^{-2\sinh^{-1}c^2 \sin^2 z} \sqrt{K_{ab} K_{ba}(1+\delta^2)} \quad (2)$$

$$P_r = c^2 + \frac{1-c^2}{1+\delta^2} \sin^2 z \sqrt{K_{ab} K_{ba}(1+\delta^2)} \quad (3)$$

여기서

$$\dots \frac{C_{ab} + C_{ba}}{2} \quad (4)$$

$$C_{pq} = \frac{1}{2} \int \int_{-\infty}^{\infty} E_t^q \times H_t^p \cdot \hat{z} \quad (5)$$

그리고  $\delta = (\beta_a - \beta_b)/2(K_{ab} K_{ba})^{1/2}$ 은 두 개의 광도파로

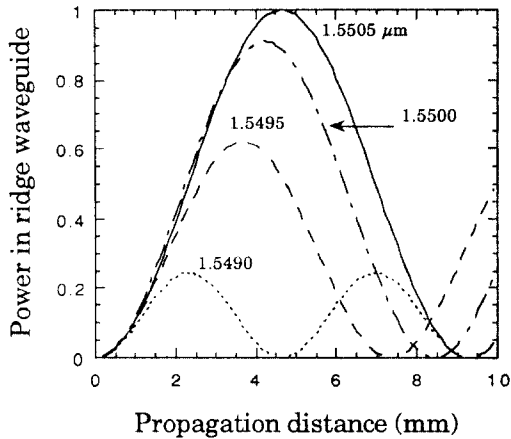


그림 5. 전파방향으로 여러 파장에 대한 ridge waveguide의 광전력 변화.

Fig. 5 The evolution of the power coupled to ridge waveguide in the propagation direction at different wavelengths.

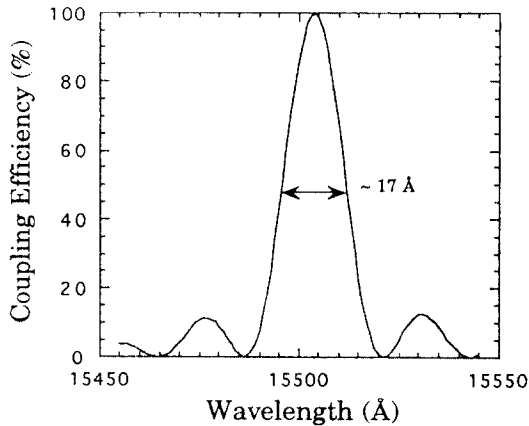


그림 6. 중심파장이 1.5504μm인 파장여과기의 응답특성곡선. 여기서, H=0.66μm, W=3.0μm, D=2.78μm, L=20.0μm, G=60.6m이다.

Fig. 6 Wavelength filter response centered at 1.5504μm with the following parameters: H=0.66μm, W=3.0μm, D=2.78μm, L=20.0μm, G=0.6μm.

의 전파상수의 차이(asynchronism)을 나타내는 변수로서 중심파장에서는 값이 영이 되나, 그밖의 파장에서는 유한한 값을 갖는다. 빛이 진행하는 방향을 따

라 매 100μm마다 step transition 방식으로 10mm까지 P<sub>1</sub> 및 P<sub>2</sub>의 변화를 파장을 변화시키면서 조사하여 두 광도파로 사이의 광전력 결합특성을 관찰하였다.

결합기 구조는 소자 내부적으로 파장스위치 기능을 하게 되는데, 그림 5에 TE 편광일 경우 파장변화에 따른 P<sub>1</sub>의 변화를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 완전한 광전달(100%)은 분산곡선상에서 교차되는 파장에서만 발생하고, 다른 파장에서는 상대적으로 최대 광전달양이 감소하게 된다. 모의전산결과 1.5505μm에서 완전 광전달이 생기고, 결합길이는 4.6mm이다. 따라서 소자길이를 4.6mm로 고정하고 파장변화에 대한 결합효율(P<sub>1</sub>/P<sub>1</sub>+P<sub>2</sub>)의 변화를 계산하면 그림 6과 같이 파장여과기 응답특성곡선이 얻어지고 약 17 Å의 FWHM(full width half maximum) 여과대역폭을 보인다.

### III. 파장가변특성

고밀도, 고효율 WDM 기능을 얻기 위해서는 여과기 통과파장의 가변성이 요구된다. 앞에서 열거한 단일 소자로서의 파장 여과기의 개념을 확대하여 ridge의 폭을 달리하는 여러개의 여과기들을 배열<sup>[5]</sup> 식으로 제작함으로써 각기 다른 파장만을 통과시켜 궁극적으로는 통과파장의 가변 특성을 얻게 된다. Strip-loaded 광도파로의 구조는 고정하고 ridge의 폭을 변화시켜 줌으로서 중심 통과 파장의 변화를 얻을 수 있는데 ridge 폭을 2에서 6μm까지 달리함으로써 중심 파장이 약 110nm 변하게 된다<sup>[5]</sup>. 또한 ridge 혹은 strip-loaded waveguide에 외부전압을 인가함으로써 굴절률을 변화시켜 결과적으로 분산곡선의 교차점이 이동하게 되어 통과파장이 변하게 된다. 일반적으로 화합물반도체에서는 p-n 접합형태의 구조에서 carrier 주입에 의한 효과, 역방향 전압에서 electro-optic(EO) 효과 등이 굴절률 변화를 위해 널리 쓰인다. 동작원리는 그림 7에서 볼 수 있듯이, strip-loaded waveguide는 고정하고 ridge waveguide의 굴절률을 증가시키면 분산곡선의 교차점이 λ<sub>1</sub>에서 λ<sub>2</sub>로 이동하게 된다.

우선 역방향 전압의 EO효과에 의한 굴절률 변화 및 가변성을 살펴 보았다. 발표된 InGaAlAs 물질의 EO 계수<sup>[6]</sup>를 고려하여 구한 linear 및 quadratic EO 효과에 의한 굴절률 변화는 상대적으로 작았으며, 5V

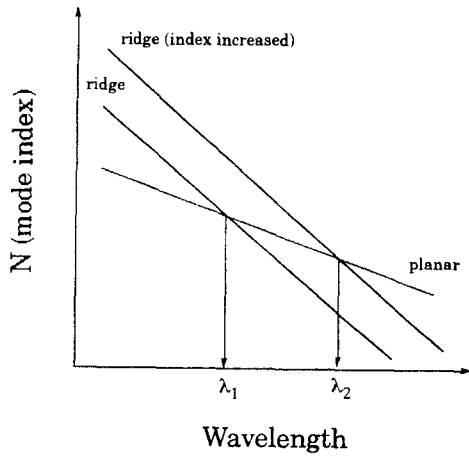


그림 7. Ridge waveguide의 굴절률 증가에 의해 중심파장이  $\lambda_1$ 에서  $\lambda_2$ 로 이동하여 파장가변성을 보인다.

Fig. 7 Shifting of the center wavelength from 1 to 2 with increase of the ridge waveguide refractive index resulting in the wavelength tunability.

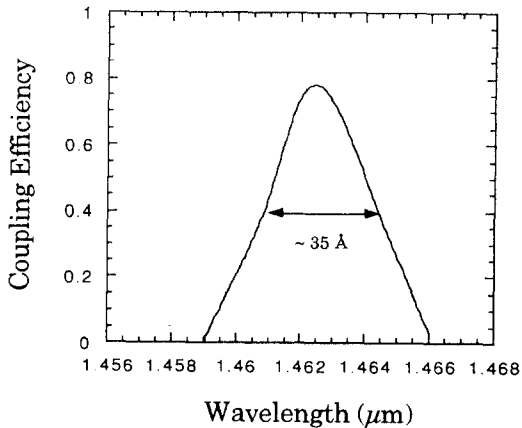


그림 8. 1550nm에서 1462nm로 여과중심파장이 가변했을 경우의 응답특성곡선.

Fig. 8 The response of 88nm tuned(from 1550nm to 1462nm) wavelength filter.

인가전압에서 수 nm 정도의 파장가변만이 가능했다. 그러나 carrier 주입에 의한 굴절률 변화는 주로 물질 자체의 bandgap shift 및 bandgap shrinkage에 기인하며 EO 효과를 이용할 경우보다 매우 큰 변화량을 갖

게 된다. InGaAlAs의 carrier 주입에 의한 굴절률 변화 값은 정확히 알려져 있지 않으므로, GaAlAs 경우 사용되는 semi-empirical 관계식<sup>[7]</sup>을 상대적인 밴드갭 차이를 보정하여 모의전산 하였다. Ridge waveguide에 주입되는 carrier가  $1.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 일 경우 굴절률은 크게 감소하게 되어 중심파장은 1550nm에서 1462nm로 약 88nm 가변하게 된다(그림 8). 반면에 통과 대역폭은 17 Å에서 35 Å으로 두 배 증가함을 보인다. 이러한 대역폭 증가는 carrier 주입에 의한 ridge waveguide 굴절률 변화의 분산특성에 기인한다. 즉 ridge waveguide의 굴절률 변화량이 밴드갭(본 논문의 경우  $1.43 \mu\text{m}$ ) 근처에서 최대가 되는 반면 장파장에서는 감소하여 결국 분산곡선의 경사(slope)가 줄어 들게 된다. 참고 문헌 8의 결과는 오히려 통과대역폭이 감소하여 본 연구의 결과와 상이한 경향을 보이고 있다. 따라서 가변파장 영역을 증가시키기 위해서는 통과대역폭의 증가를 감수해야 하며, 좁은 대역폭을 원할 경우에는 중심파장의 가변능력이 제한되므로 시스템 응용 목적에 맞추어 각각의 특성에 대한 최적설계가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 모의전산을 통해 중심파장의 가변성 및 통과파장의 변화를 알아보기 위해 단순히 주입 전하밀도를 변수로 하여 굴절률변화를 얻었다. 실제로 소자를 제작할 경우에는 p type 및 capping층을 ridge waveguide 위에 적층하게 되므로 소자특성 전반에 변화를 갖게 될 것이다. 또한 필요한 주입전류의 크기는 형성된 다이오드의 특성 및 불순물농도 등에 의해 결정되는데,  $1.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 의 carrier를 주입하기 위해서는 비슷한 형태의 ridge구조 레이저다이오드의 발진개시전류 정도의 주입전류(수십mA)가 필요할 것으로 예상된다.

#### IV. 실험

소자의 제작을 위해서는 먼저 InP 기판 위에 여러 층의 다른 성분을 갖는 InGaAlAs(각 층의 조성성분은 그림 2를 참조)이 성장 되었다. 각각의 성장된 층들의 두께 및 성분의 정확한 조절이 여기기의 동작 파장을 결정하는데 매우 예민하게 작용한다. 제작은 보편적으로 널리 쓰이는 photolithography와  $\text{H}_3\text{PO}_4$ 를 이용한 wet etching을 통해 이루어 졌고, 초기에 빛

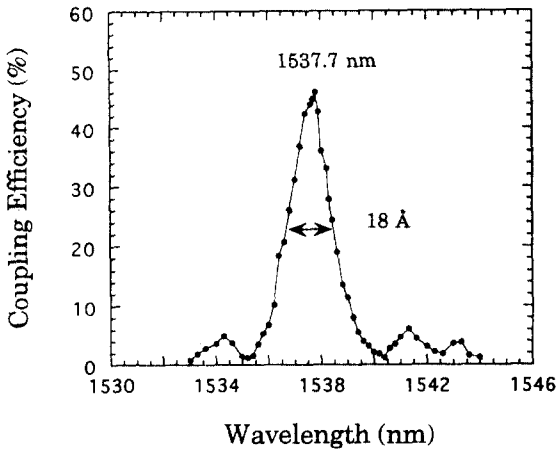


그림 9. Ridge waveguide에서 측정된 파장여과기 응답특성으로 18 Å의 FWHM 통과대역폭을 보인다.

Fig. 9 The measured filter response of ridge waveguide where the FWHM bandwidth is 18 Å.

을 소자에 입사할 때에 ridge 광도파로의 결합을 최소화 하기 위하여 2-3mm의 여유길이<sup>[6]</sup>를 ridge 광도파로 앞에 둔다. Ridge와 strip을 형성하기 위해 2 단계 식각과정을 수행하였다. 제작된 소자는 약 5mm의 길이로 cleaving하고 특성측정에 앞서 양 단면에 산화막을 입혀 소자길이 방향으로의 공진효과를 최소화 하였다. 제작되어진 소자의 특성은 lock-in된 tunable light source(HP) 와 Ge 광검출기를 통해 측정되었다. 100KHz 이하의 선폭을 갖는 tunable light source가 1480-1570nm 사이를 가변하고 ridge 광도파로에서 나오는 출력전력은 objective렌즈를 통해 광검출기에 모아진다. 이 경우 strip-loaded 광도파로에 남은 광전력이나 산란되는 빛들을 격리시키기 위해 여러 개의 aperture가 쓰였다.

### V. 결과 및 고찰

TE 편광 모드 일 때 측정된 여과기 응답특성이 그림 9에 보인다. 중심 통과 파장은 1537.7nm이고 통과대역의 반폭(FWHM)은 18 Å 이며 약 50%의 광전력이 strip-loaded에서 ridge 광도파로로 전달 되었다. TM 모드인 경우에는 유효굴절율의 변화에 따라 일반적으로 TE의 경우보다 작은 파장인 1517nm에서

최대 통과파장을 갖게되며 광전력 전달효율은 68%까지 측정되었다. 여기서 모의전산과 실험결과를 비교해 보면 다음의 차이를 갖는다. 먼저 측정된 통과 중심파장이 설계 값보다 짧은 파장으로 이동하였고, strip-loaded waveguide에서 ridge waveguide로 연결된 광전력 전달효율이 계산한 것보다 감소하였다. 모의전산을 통해 여러 변수가 소자 동작특성에 미치는 예민성을 조사해 본 결과 중심파장의 변화를 줄 수 있는 가장 큰 변수는 사용된 반도체 각 층의 굴절률 값이 갖는 오차로서 이는 결정성장 방법 및 불순물 주입 정도에 따라 쉽게 변화될 수 있다. 더불어 소자 제작과정에서 발생하는 실험오차도 중심파장 선택에 많은 영향을 끼치는데 ridge waveguide의 너비, 높이 등이 여기에 포함된다. 광전달효율은 이론적으로 100%를 보여야 하지만, 측정상에서 ridge waveguide에 가두어진 광전력을 strip-loaded waveguide에 가두어진 광 및 산란 광으로 부터 분리해 내는 과정에서 생긴 오차로 추정한다. 한편 실제 방향성 결합기의 결합길이가 계산값과 차이가 날 경우에도 최대 광전력 전달효율은 감소하게 된다.

### VI. 결 론

이상에서 살펴 본 바와 같이 화합물반도체를 이용한 비대칭 수직 방향성 결합기 구조의 파장 여과기가 모의전산을 통해 설계되었고 실험적으로 협대역 통과 특성이 증명되었다. 동작 파장은 광전송 파장인 1.55μm 대역이고 측정된 파장 대역 폭은 18 Å 인데 설계결과와 비교적 잘 일치하였다. 더욱이 외부전압을 인가함으로써 중심파장을 수십 nm 이상 쉽게 가변시킬 수 있는 장점을 가짐으로서 향후 WDM 시스템 및 광 변환 네트워크 등의 응용에 매우 유용할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. R. C. Alferness, and R. V. Schmidt, "Tunable optical waveguide directional coupler filter", Appl. Phys. Lett., vol. 33, pp. 161, 1978.
2. P. C. Kendall, P. W. A. Mcilroy, and M. S. Stern, "Spectral index method fo rib waveguide analysis",

- Electron. Lett., vol. 25, pp. 107, 1989.
3. S. L. Chuang, "A couple mode formulation by reciprocity and a variational principle", J. Lightwave Technologies, vol. LT-5, pp. 5, 1987.
  4. E. Marcatili, "Improved coupled mode equation for dielectric guides", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-22, pp. 988, 1986.
  5. S. K. Han, R. V. Ramaswamy, and R. F. Tavlykaev, "Narrowband vertically stacked filters in InGaAlAs/InP at  $1.5\mu\text{m}$ ", IEEE J. Lightwave Technol., vol. LT-14, pp. 77, 1996.
  6. S. K. Han, R. V. Ramaswamy, W. Q. Li, and P. K. Bhattacharya, "Efficient electro-optic modulator in InGaAlAs/InP optical waveguides", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, pp. 46, 1993.
  7. S. S. Lee, R. V. Ramaswamy, and S. Sundaram, "Analysis and design of high-speed high-efficiency GaAs-AlGaAs double heterostructure waveguide phase modulator", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 726, 1991.
  8. C. Wu et al., "InGaAsP/InP vertical directional coupler filter with optimally designed wavelength tunability", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, pp. 457, 1993.
  9. S. K. Han, R. V. Ramaswamy, and R. F. Tavlykaev, "A highly asymmetrical vertical coupler wavelength filter in InGaAlAs/InP", Electron. Lett., vol. 31, pp. 29, 1995.



한 상 국(Sang-Kook Han) 정회원

1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 졸업(학사)

1988년 12월: University of Florida, Electrical Engineering 졸업(석사)

1994년 8월: University of Florida, Electrical Engineering 졸업(박사)

1994년 9월~1996년 2월: 현대전자(주) 시스템IC연구소 선임연구원

1996년 3월~현재: 연세대학교 전파공학과 조교수

※주관심분야: WDM용 광소자, 광통신시스템, Microwave Photonics 등