

다중모드 간섭기를 이용한 반도체 이중사각형 링 공진기에서의 단일모드 발진 특성

정달화 · 문희종 · 현경숙[†]

세종대학교 전자정보통신공학부 광전자공학과
Ⓞ 143-747 서울 광진구 군자동 98

(2008년 10월 29일 받음, 2009년 1월 5일 수정본 받음, 2009년 1월 5일 게재 확정)

다중모드 간섭기를 이용한 반도체 이중사각형 링 공진기에서의 단일 파장 모드 발진특성을 관찰하였다. 실험에 사용된 공진기의 에피택시는 발진 중심파장이 1.55 μm 인 InGaAsP-InP 다중양자우물 구조를 활성층으로 사용하여 제작되었다. 공진기의 구조는 다중모드 간섭기를 결합기로 이용한 이중사각형 링 공진기이며 발진특성을 측정하였다. 여러 가지 구조 변수를 즉 공진기의 구조 및 크기, 다중모드 간섭기의 길이를 변화시키며 실험을 진행하였다. 실험 결과 다양한 크기와 구성에서 단일파장모드선택 특성이 잘 나타남을 확인할 수 있었다.

주제어: Microcavity, Multimode Interference, Semiconductor Laser, Single mode lasing

I 서 론

링 공진기는 10^{10} 정도의 높은 Q값(Quality Factor)과 작은 크기의 장점으로 인하여 광전분야와 측정과학 분야 응용을 위한 새로운 소자로서 주목을 받고 있다. 그 중 반도체 링 공진기는 초고속 광통신을 위한 photonics integrated circuits (PICs)의 구성요소로서 사용가능성이 높기 때문에 많은 연구가 진행되어 오고 있다.^[1,2] 반도체 링 공진기는 반도체와 공기사이의 높은 굴절률의 차이로 인하여 도파로 내에 빛이 강하게 가두지는데 이러한 특징을 이용하면 미세한 차이 또는 미세한 양의 빛이라도 센싱이 가능하여 바이오 분야 또는 나노물질등의 측정에 이용할 수 있다.

이러한 반도체 링 공진기를 이용한 레이저는 벽개면(Cleaving Facet)이나 격자(grating)등을 필요로 하지 않으므로 여러 가지 성능의 소자 집적 제작이 용이한 특성이 있으며, 외부 피드백조건에서도 안정된 파장을 제공할 수 있는 장점을 포함하고 있다. 또한 반도체 링 공진기는 다른 여러 가지 기능을 갖는 능동 수동 요소들과 회로를 이용하여 집적할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 특히 통신용 소자로는 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) 또는 CWDM(Coarse Wavelength Division Multiplexing)에서 집적형 필터로서도 사용이 가능하다.

특히 InP기반의 반도체 링 공진기는 통신용 파장에서 반응하지 않는 실리콘 또는 실리카등과 같은 물질을 기반으로 하는 다른 집적법들과 비교했을 때, 능동소자와 수동소자와의 단일 집적화가 가능하고, 깊게 에칭된 구조의 경우에 반도체와 공기사이의 큰 굴절률 차이로 인하여 LSI(Large-Scale integrated) 포토닉스에 알맞은 높은 광학적 측면 가둠 효과를 가지게 된다.^[3-6]

수동 필터 구성요소로서 반도체 링공진기는 높은 Q-값, 좁

은 선폭, 넓은 파장 간 간격(FSR: Free Spectral Range)이 요구된다.^[3-6] 그러나, 높은 Q-값의 링 공진기는 낮은 출력 파워를 갖고, 외부 커플링 도파로 없이는 출력 방향을 제어하는데 있어서 약한 특성을 보인다.^[9] 이러한 문제들을 해결하기 위해 수동 직선 도파로와의 커플링에 의해 출력파워를 높일 수 있지만, Q-값이 강하게 감소하는 특성을 보인다.^[10] 또한, 단일 공진기를 사용하여 파장을 조절하는 것은 매우 제한적이고, 광통신을 위한 응용에는 충분하지 않은 단점이 있다.

본 논문에서는 단일 발진을 유도하기 위하여 사각 링공진기를 이용하였으며, 일반적으로 링 공진기와 도파로의 결합이 파장보다 작은 sub μm 이하의 제작과정이 요구되는데, 이를 개선하는 방법으로 다중모드간섭기의 개념을 이용하여 공진기와 공진기 또는 공진기와 도파로를 연결하는 구조를 제안하였다. 제안된 다중모드 간섭기를 이용한 반도체 이중사각 링 공진기는 위에서 열거한 장점을 지니면서 FSR(free spectral range)을 조절할 수 있고, 필요한 경우 단일 파장 발진을 제공할 수 있다.

본 연구에서는 단일 파장 발진 특성에 최적화된 구조를 도출하기 위하여, 사각링 공진기의 구성 및 다중모드 간섭기의 길이를 변화시키며 실험을 진행하였다. 일반적으로 사각 링 공진기에 대한 연구는 이전의 연구에서 행해졌으며,^[11] 본 연구는 이러한 공진기 두 개를 결합하여 단일 모드 발진을 하는 것이 목표이고 그림 1을 살펴보면 다중모드 간섭기를 이용한 반도체 이중사각형 링 공진기에서 단일모드 발진특성이 나타남을 확인할 수 있다. 각각 크기가 다른 두 개의 공진기는 다중모드 간섭기에 의해 커플링되는데, 다중모드 간섭은 자기상 멧힘 원리로 설명 가능하다. 자기상 멧힘이란, 도파로의 전파방향을 따라 주기적인 간격에서 단일 혹은 다중 이미지가 출력단에 재생되는 현상을 의미한다. 주어진 다중모드 간섭기의 폭에 대하여 출력되는 빛의 개수는 다중모드 간섭기의 길이에 따라 결정된다. 이러한 다중모드 간섭기를 이용한 반도체 링 공진기는 단일모드 선택 특성을 강화시

[†]E-mail: kshyun@sejong.ac.kr

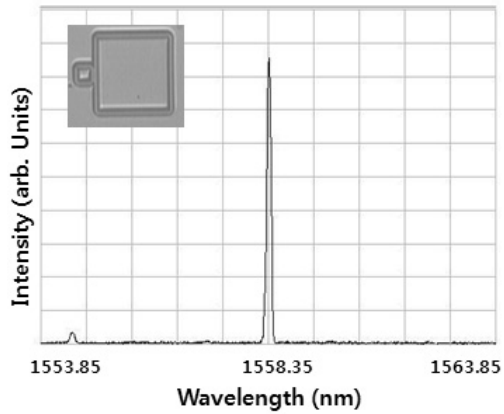


그림 1. 다중모드간섭기를 이용한 캐비티의 발진특성.

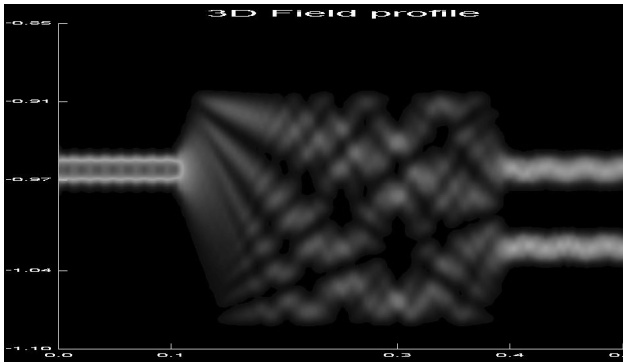


그림 2. 실험에 사용된 다중모드 간섭기 내에서의 빛의 진행모습.

켜 광 스위칭, 레이저 필터 등의 다양한 광소자 그리고 광 소자 집적에 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

II. 본 론

2.1. 다중모드 간섭기와 모드간격

2.1.1 다중모드 간섭기

다중모드 간섭기의 원리는 자기상 빔힘으로, 도파로의 진행방향에 따라 주기적으로 입력광과 같은 모양이 하나 또는 여러 개의 상으로 나타나는 것을 의미한다. 다중모드 간섭기

는 구조가 간단하고 소자의 크기가 작으며 낮은 삽입손실을 가지며, 넓은 대역폭을 갖고, 제작시 허용오차가 크고 간편하며 다른 소자와의 집적이 용이한 장점을 가지고 있다.^[12]

그림 2는 실험에 사용한 1x2구조의 다중모드 간섭기 내에서 빛이 진행되는 모습이다. 다중모드간섭기는 입력단에 특별한 제한이 없는 일반적인 구조, 두 개의 입력이 입력단 위 아래에 존재하는 쌍 구조, 중심에 하나의 입력을 갖는 대칭 구조 3가지로 구분되는데, 논문에서는 두 개의 입력을 갖는 쌍 구조의 다중모드 간섭기를 사용하였다. 다중모드 간섭기의 길이를 조정하면 출력되어 나오는 빛의 개수 및 위치가 결정되는데 이는 가장 낮은 차수의 두 개의 모드 길이 차인 비트길이를 통하여 계산 가능하다.^[12] 다중모드간섭기의 길이를 결정하는데 기본적으로 사용하는 비트길이는 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$L_{\pi} \cong \frac{4n_r W_c^2}{3\lambda_0} \quad (1)$$

위 식에 필요한 유효두께는 다음식으로 계산된다.

$$W_c \cong W_M + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_c}{n_a}\right)^{2\sigma} (n_c^2 - n_a^2)^{-(1/2)} \quad (2)$$

W_M : MMI 두께

n_c : MMI 내부 굴절률

n_a : MMI 외부 굴절률(공기)

σ : = 0 for TE = 1 for TM

λ_0 : 중심파장

(1)의 식을 이용하면 쌍 구조의 다중모드간섭기에서 처음으로 하나의 출력이 나오는 길이를 (3)의 식으로 정의할 수 있다.

$$L = L_{\pi} \quad (3)$$

(3)의 길이를 포개면 포개는 횟수에 따라 2개, 4개, 8개, ...의 출력이 나오는 길이가 정의된다.

$$L = \frac{L_{\pi}}{N} \quad (4)$$

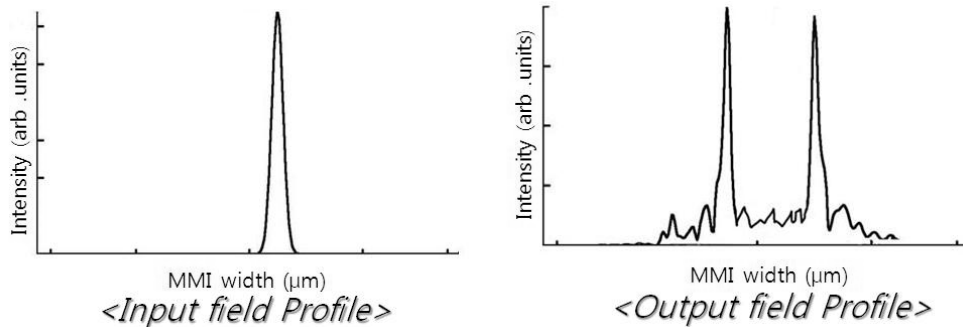


그림 3. 다중모드 간섭기 내의 Input Field와 Output Field의 모양.

그림 3은 다중모드 간섭기 내에서 입력단과 출력단에서의 모드 형태를 나타낸 그림이다. 각각의 공진기 내에서 공진되는 빛이 다중모드 간섭기 지역에 다다르면 입사된 빛이 50:50의 비율로 나누어져 일부는 자기 자신으로 일부는 다른 캐비티로 진행되어 공진됨을 확인할 수 있다. 실험에 사용된 모든 다중모드 간섭기의 길이는 입력된 빛이 50:50의 비율로 나누어져 진행된 후 공진기의 오른쪽 코너부근에서 수집되어 관찰되었다.

2.1.2 모드 간격

이중 사각형 링 공진기의 모드 간격은 단일 링 공진기의 모드간격을 이용하여 구할 수 있다. 단일 링 공진기에서 모드간격은 공진기의 유효길이, 굴절률 그리고 파장분산에 의해 결정되며 식은 다음과 같다.

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n \cdot L_R} \left(\frac{1}{1 - (\lambda/n)(dn/d\lambda)} \right) \quad (5)$$

L_R = 유효길이

n = 굴절률

$dn/d\lambda$ = 파장분산

실험에 사용된 45° 경사진 코너를 갖는 링 공진기의 경우 유효길이는 링 공진기의 직경과 도파로 크기에 의해 결정되며 식은 다음과 같다.

$$L_R = 4 \times [D - (2 - \sqrt{2})e]. \quad e = \sqrt{2} \cdot w \quad (6)$$

D : 직경

w : 도파로 두께

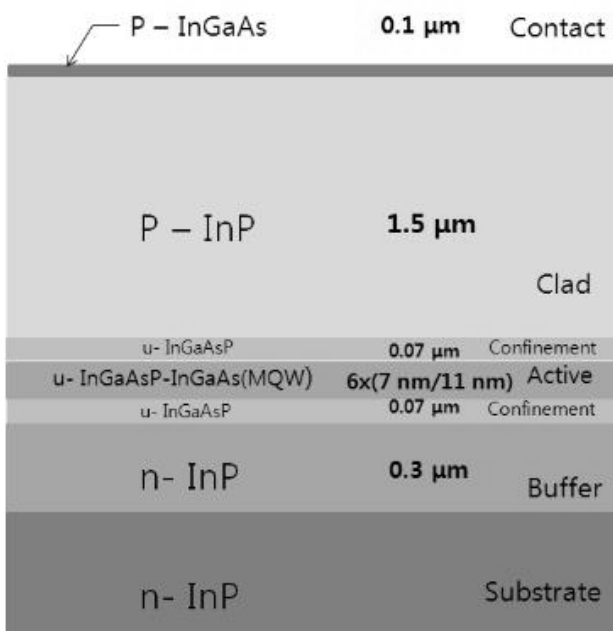


그림 4. 다중모드 간섭기를 이용한 반도체 링 공진기의 에피구조.

크기가 다른 두 개의 이중사각형으로 이루어진 링 공진기의 모드 간격은 식 (5), (6)을 이용하여 각각의 공진기의 모드 간격의 최소공배수를 이용하면 구할 수 있다.

$$FSR_{tot} = N \times FSR_1 = M \times FSR_2 \quad N, M = 1, 2, 3... \quad (7)$$

예를 들어, 직경 $D_1 = 50 \mu\text{m}$, $D_2 = 100 \mu\text{m}$ 도파로 두께 $w = 3 \mu\text{m}$ 인 링 공진기의 경우 각각 $FSR_1 = 3.53 \text{ nm}$, $FSR_2 = 1.61 \text{ nm}$ 의 값을 갖고, (7)의 식을 이용하면, $FSR_{tot} = 17.70 \text{ nm}$ 의 값을 얻을 수 있다. 즉, 크기가 다른 두 개의 이중사각형의 모드 간격은 각각의 공진기의 스펙트럼이 오버랩 되어 일치하는 부분만 발진되는 특성을 갖게 됨을 알 수 있다.

2.2. 소작제작 및 실험 구성

그림 4는 실험에 사용된 에피의 구조를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 에피구조는 n-InP를 기판으로 하여 InGaAsP의 clad층, InGaAsP/InGaAs 다중양자우물 구조의 활성층 순서로 제작하였다. 중심파장은 장거리 광통신에 적합한 $1.55 \mu\text{m}$ 대역이며, 소자는 일반적인 반도체 표준 제작 공정인 포토 리소그래피와 Reactive Ion Etching(RIE)을 사용하여 제작되었다. 전체 에칭 깊이는 $4.2 \mu\text{m}$ 로 하여, 반사되는 동안 기판 내로 캐비티 모드가 진행하여 손실되는 것을 금지하였다.

그림 5는 제작된 다중모드 간섭기를 이용한 반도체 링 공진기의 구조이다. 각각 크기가 다른 두 개의 단일 캐비티를 다중모드 간섭기를 이용하여 연결하였고, Inner구조와 Outer구조로 제작하였다. 작은 정사각형 캐비티 한 변의 길이가 다중모드 간섭기 길이로 정의되며, 다중모드 간섭기 길이, 캐비티의 도파로 두께, 캐비티의 크기를 구조변수로 하여 최적화된 구조 및 크기를 도출하였다.

그림 6은 실험장치구성을 나타낸 그림이다. 다중양자우물 구조를 광 펌핑하기 위하여 $1.06 \mu\text{m}$ 에서 동작하는 Nd:YVO₄ 레이저를 사용하였다. 이 파장대에서 펌핑된 빛은 윗 클래딩을 관통하고 다중양자우물에 의해 강하게 흡수되어 전자를 여기시키고, 공진기에 맞는 파장의 발진이 일어난다. 펌프 빔에 의해 생기는 굴절률의 열적인 변화를 최소화하기 위해 레이저는 10 kHz의 AO(Acoustic Optic) Q-스위칭을 사용하

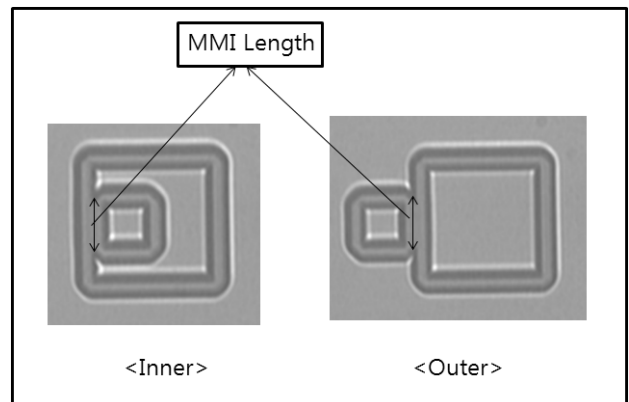


그림 5. 실험에 사용한 공진기의 제작형태.

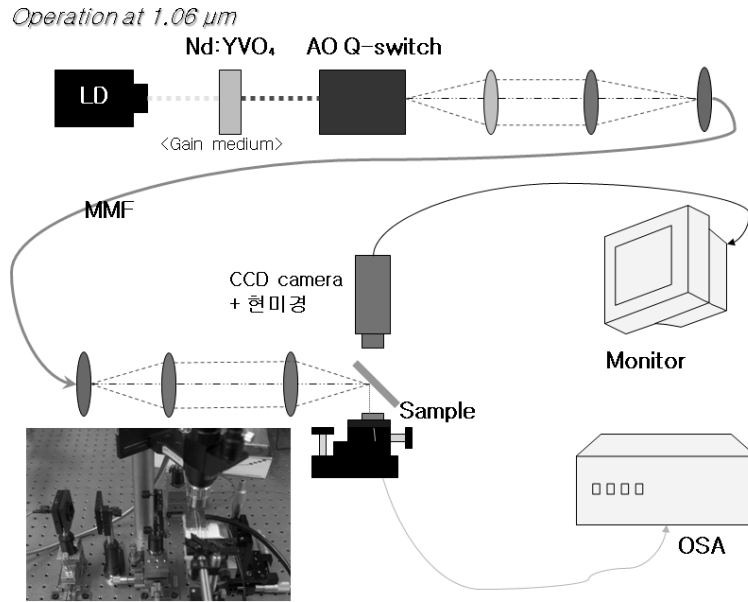


그림 6. 실험장치의 개념도.

여 평균 펄스 파워를 감소시켰다. 펄스 빔의 펄스 두께는 약 300 ns로 측정 되었고, 펄스 빔은 45°빔 스플리터에 통과시켜 소자위로 수직 입사되도록 하였다. 이 과정은 긴 동작 거리를 갖는 고 분해능 현미경에 CCD카메라를 부착시켜 관찰하였다. 웨이퍼 위에서 측정된 빔 사이즈는 ~500 μm 이다. 광펌핑에 의해 발진된 신호는 캐비티 코너 부근에서 taperd fiber에 의해 수집되었고, 발진 특성은 Optical Spectrum Analyzer (OSA)를 사용하여 관찰하였다.

다중모드 간섭기 두께 및 길이에 따른 특성을 확인하기 위하여 6.00 μm , 8.00 μm , 10.00 μm 로 두께를 변화시켰다. 두께에 따른 다중모드 간섭기의 이론적인 길이는 식 (1), 식 (2), 식 (3), 식 (4)를 사용하여 계산 가능하다. 두께가 6.00 μm 일 때 이론적으로 하나의 출력이 나오는 길이는 110.30 μm 이고, N번 접힌 길이는 55.15 μm , 27.58 μm , 13.79 μm 이다. 이론으로 도출된 길이는 zeroth order 와 first order의 빛이 진행될 때를 근거로 계산된 길이이고 실제로 MMI내에서 빛이 진행할때에는 낮은 두 개의 차수에 해당하는 빛만 진행되는 것이 아니라 second, third order의 빛도 진행하므로 계산상의 길이와는 차이가 존재한다. 이로 인한 오차는 산술적인 계산으로는 복잡하여, BPM 을 이용하여 구하였고, 두께가 6.00 μm 일 때 실험에서 사용한 MMI 길이는 50.00, 35.00, 15.00 μm 이다. 두께가 8.00 μm 일 때 식 (1)을 이용하여 구한 하나의 출력이 나오는 길이는 191.00 μm 이고, N번 접힌 길이는 96.50 μm , 47.75 μm , 23.88 μm 이다. 이론적으로 길이를 구하기 위하여 사용한 변수들, 즉 양자우물을 이용한 반도체의 유효굴절률, 두께, 실험에서의 공정 오차등을 감안하면 계산에서 구한 길이를 소수점까지 사용하는 것은 큰 의미가 없다. 그리고 본 실험에 사용한 MMI 구조의 경우 입력단과 출력단의 길이를 정확하게 규정하기 어려우며 이로 인하여 MMI 허용 길이가 다른 소자들에 비하여 매우 여유가 있으므로 실

제 실험에서는 45.00 μm , 25.00 μm 를 사용하였다. 두께가 16.00 μm 일 때 하나의 출력이 나오는 길이는 734.10 μm 이고, N번 접힌 길이는 367.05 μm , 183.53 μm , 91.76 μm , 45.88 μm , 22.94 μm 이고 앞에서 설명한 바와 같은 이유로 실험에서 사용한 길이는 48.00 μm , 24.00 μm 이다.

2.3. 실험내용 및 분석

캐비티 구성에 따른 특성을 살펴보기 위해 그림 7과 그림 8의 발진특성을 비교하여 보았다. 큰 캐비티를 캐비티1로 지

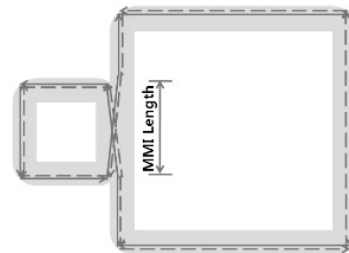


그림 7. 100-25-4 크기의 Outer구조를 갖는 공진기 내에서 빛이 공진하는 모습.

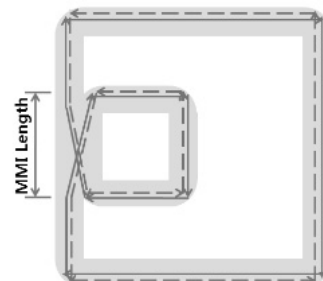


그림 8. 100-25-4 크기의 Inner구조를 갖는 공진기 내에서 빛이 공진하는 모습.

정하고 작은 캐비티를 캐비티2로 지정하였다. 다중모드 간섭기의 두께는 도파로의 두께로 결정되고, 길이는 작은 캐비티의 한 변의 길이로 정의된다.

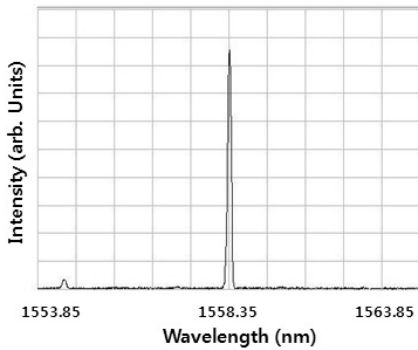
그림 9는 캐비티1의 길이가 100 μm , 캐비티2의 길이가 25 μm , 다중모드 간섭기의 두께 8 μm 길이 25 μm 인 Outer구조를 갖는 그림 7의 발진 특성을 나타낸 그림이다. 그림 9를 살펴보면, 장거리 통신에 알맞은 1550 nm에 가까운 1558.35 nm의 중심파장을 갖고, 반치폭은 약 0.046 nm로 측정되었다.

그림 10은 캐비티1의 길이가 100 μm , 캐비티2의 길이가 25 μm , 다중모드 간섭기의 두께 8 μm 길이 25 μm 인 Inner구조를 갖는 그림 8의 발진 특성을 나타낸 그림이다. 그림 10을 살펴보면, 장거리 통신에 알맞은 1550 nm에 가까운 1561.94 nm의 중심파장을 갖고, 반치폭은 약 0.077 nm로 측정되었다.

표 1은 실험에 사용된 다양한 크기와 구성을 갖는 링 공진기의 중심파장 및 반치폭과 모드간격 그리고 Q-값을 정리하여 나타낸 표이다. 크기를 표시하는 방식은 cavity1-cavity2-도파로 두께의 형식으로 정리 되었고, 다중모드 간섭기의 두

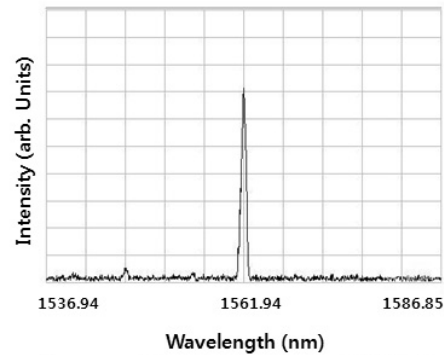
께는 각각의 캐비티의 도파로 크기를 합친 것으로 정의될 수 있다. 다양한 크기와 MMI 길이를 가진 공진기에서 대부분 단일 파장 발진이 일어나고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 반사면과 도파로 옆면은 반도체 에칭 공정에 의하여 결정이 되는데 에칭면의 거칠기를 최대한 줄이는 것이 발진 효율을 높이고 문턱 파워를 낮추는 데 도움을 줄 것으로 판단되며 이는 단일 사각형 캐비티에서도 다른 바 있다.^[11]

MMI 길이가 달라도 단일 파장 발진이 일어나고 있는 이유는 다음과 같이 분석할 수 있다. 본 실험에서 사용한 공진기 도파로 폭이 넓어서 이미 공간적으로 다중모드가 존재하게 되며 이러한 다중 모드가 MMI 에 입사하게 된다. 이 경우 빛의 세기가 특정한 비율(예를 들면 50:50)로 분리가 되는 것이 아니라 주어진 공진기 상황에 따라 비율이 나누어지게 된다. 따라서 MMI길이가 변하게 되면 주어진 상황에서 빛의 세기가 두 개의 공진기에 주어진 상황에 해당하는 비율(미리 정한 비율 50:50이 아니라 30:70, 20:80 등등의 비율)로 빛의 세기가 분할되고, 이는 또한 두 개의 공진기를 결합하는 결합기의 역할을 하게 되고, 역시 단일 파장 발진이 일



Center Wavelength = 1558.35nm
FWHM (Full Width Half Maximum) = 0.046nm

그림 9. 100-25-4 크기의 Outer 구조를 갖는 공진기의 발진 특성.



Center Wavelength = 1561.94nm
FWHM (Full Width Half Maximum) = 0.077nm

그림 10. 100-25-4 크기의 Inner구조를 갖는 공진기의 발진 특성.

표 1. 다양한 크기와 구조를 갖는 다중모드 간섭기의 중심파장 및 반치폭.

Dimensions	Compositions	center wavelength(nm)	FWHM (nm)	FSR(계산) (nm)	FSR(측정) (nm)	Q값 ($\times 10^4$)
100-30-3	Outer	1563.56	0.046	24.30	∞	3.40
100-25-4	Outer	1558.35	0.046	15.50	21.21	3.39
100-45-4	Outer	1547.46	0.073	12.10	∞	2.12
80-48-8	Outer	1539.40	0.077	16.12	3.79	2.00
100-24-8	Outer	1543.60	0.046	28.80	3.03	3.36
100-48-8	Outer	1543.81	0.077	16.20	8.25	1.33
100-50-3	Inner	1539.00	0.077	17.70	∞	2.00
100-25-4	Inner	1561.94	0.077	15.50	15	2.03
100-45-4	Inner	1549.99	0.058	12.10	∞	2.67
80-48-8	Inner	1547.26	0.077	16.12	∞	2.01
100-24-8	Inner	1525.64	0.052	28.80	3.79	2.93
100-48-8	Inner	1538.35	0.077	16.20	5.30	2.00

어나게 된다.

중심파장은 최소 1558.35 nm, 최대 1561.94 nm, 평균 1546.53 nm로 전반적으로 장거리 통신에 사용되는 1550 nm의 중심 파장을 보이며 발진되었다. 반치폭을 살펴보면 최소 0.046 nm 최대 0.116 nm로 평균 0.069 nm로 매우 좁은 폭을 보이며 발진됨을 확인할 수 있었다. 중심파장과 반치폭을 이용하여 Q-값을 계산하여 보면 최소 1.33×10^4 최대 3.4×10^4 로 평균 2.44×10^4 의 값이 나타남을 알 수 있다. 이러한 구조를 통신용 소자로 사용할 때 선풍 특성으로는 충분한 값으로 판단된다. 실험에 사용된 소자의 이득곡선은 1550 nm를 중심으로 약 ± 15 nm이다. 이를 참고하여 측정된 모드 간격과 계산된 모드 간격을 살펴보면, 대부분의 소자가 이론값과 일치하는 특성을 보임을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 캐비티 내 빛이 다중모드 간섭기에 의해 일정한 비율로 두 개의 공진기에 분배되고 결합되어 발진되는 구조를 제안하였다. 표 1을 살펴보면 공진기의 구성방식은 발진 특성에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 소자 크기 측면에서 살펴보면 Outer구조보다 Inner구조가 소형화를 위해서는 더 유리함을 알 수 있다. 두 개의 공진기의 결합기 역할을 하는 다중모드 간섭기의 길이가 줄어들어도 단일파장 발진에는 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 이는 다중모드 간섭기가 빛을 50:50으로 분할하지 않고 다른 비율로 빛의 세기를 분할하더라도 공진기의 결합기로서 충분한 역할을 하기 때문으로 판단된다. 다중모드 간섭기를 이용한 반도체 링 공진기는 광 통신 소자로 사용하게 충분히 높은 Q-값과 좁은 선풍, 넓은 FSR 등 수동필터의 구성요소로서의 조건을 만족시킴을 알 수 있다. 실험에서 사용된 다양한 크기와 구성을 갖는 소자에서 단일 파장 모드 선풍 특성이 잘 나타남을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. : R01-2007-000-21036-0)>.

참고문헌

- [1] R. van Roijen, E. C. M. Pennings, M. J. N. van Stalen, T. van Dongen, B. H. Verbeek, and J. M. M van der Heijden, "Compact Inp-based ring lasers employing multimode interference couplers and combiners," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, pp. 1753-1755, 1994.
- [2] T. F. Krauss, R. M. De La Rue, P. J. R. Laybourn, B. Volgele, and C. R. Stanley, "Efficient semiconductor ring lasers made by a simple self-aligned fabrication process," *J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 1, pp. 757-760, June 1995.
- [3] B. E. Little, S. T. Chu, W. Pan, and Y. Kokubun, "Microring resonator arrays for VLSI photonics," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 323-325, Mar. 2000.
- [4] D. Rabus and M. Hamacher, "MMI-coupled ring resonators in GaInAsP-InP," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 323-325, Aug. 2001.
- [5] B. Liu, A. Shakouri, and J.E. Bowers, "Passive microring-resonator-coupled lasers," *Appl. phys. Lett.*, vol. 79, no. 22, pp. 3561-3563, 2001.
- [6] B. Liu, A. Shakouri, and J. E. Bowers, "Wide tunable double ring resonator coupled lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 600-602, May 2002.
- [7] G. Griffel, J. H. Abeles, R. J. Menna, A. M. braun, J. C. Connolly, and M. King, "Low-threshold InGaAsP ring lasers fabricated using bi-level dry etching," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 146-148, Feb. 2000.
- [8] J. P. Hohimer, D. C. Craft, G. R. Hadley, G. A. Vawter, and M. E. Warren, "Single-frequency continuous-wave operation of ring resonator diode lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 26, pp. 3360-3362, 1991.
- [9] H. Han, D. V. Forbes, and J. J. Coleman, "InGaAs-AlGaAs-GaAs strained-layer quantum-well heterostructure square ring lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, pp. 1994-1997, Nov. 1995.
- [10] L. Bach, A. Wolf, J. P. Reithmaier, and A. Forchel, "Square-and racetrack-lasers as active components for monolithically integrated optoelectronic devices," in Proc. IPRM'02, pp. 111-114, 2002.
- [11] H. J. Moon, Y. Y. Jin, K. S. Hyun and Y. H. Kwon, "Effect of Corner Shape on Whispering Gallery Mode Lasing in Semiconductor Square Microcavities," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 49, no. 4, pp. 1444-1449, Oct. 2006.
- [12] Lucas B. Soldano and Erik C. M Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging Principles and Application," *J. lightwave. Tech*, vol. 13, no. 4, Apr. 1995.

Single Mode Lasing Characteristics in Multimode Interferometer-Coupled Semiconductor Square Ring Resonators

Dal-Hwa Jeong, Hee-Jong Moon, and Kyung-Sook Hyun[†]

Department of Optical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747

[†]*E-mail: kshyun@sejong.ac.kr*

(Received October 29, 2008; Revised manuscript January 5, 2009; Accepted January 5, 2009)

We report the spectral characteristics of Multimode Interferometer (MMI)-coupled semiconductor square ring resonators. The epitaxial layers of the proposed semiconductor ring resonator consists of 1.55 μm GaInAsP-InP multiple quantum wells. The lasing characteristics were observed by varying the structure parameters of the MMI-coupled square ring resonators. It is concluded that the MMI-coupled scheme selects a single spectral lasing mode in the double square ring cavities.

OCIS codes: (140.4780) Optical resonators; (230.0230) Optical devices; (130.3120) Integrated optics devices.