

광역기 면형 광증폭기의 이득해석 및 제작

정희원 김운하*, 정기태*, 조용환**

Analysis and assessment of the gain of optically pumped surface-normal optical amplifiers

Woon-Ha Kim*, Ki-Tae Jeong*, Yong-Hwan Cho** *Regular Members*

요 약

광역기 MQW(Multiple Quantum Well)면형 광증폭기에 대한 이득해석과 더불어 제작 및 측정을 수행하였다. 제안된 광증폭기는 편광무의존성, 광섬유와의 높은 결합효율, 그리고 동작파장의 자유도가 높다는 등의 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 100내지 200주기 MQW의 이득특성을 격자왜곡과 선택도핑의 효과를 고려해 해석하였다. 그 결과, 3dB정도의 단일경로이득과 넓은 동작파장특성을 나타내었으며 이 해석 결과는 우리들이 행한 실험결과와 거의 일치하였다. 면형 광증폭기의 단일경로이득이 낮으면 FPI(Fabry-Perot Interferometer) 구조로 증폭률을 높이는 데는 협대역성의 문제가 발생하나, 2-3dB이상의 적절한 단일경로이득을 가질 경우, FPI 구조로 고이득과 적절한 동작파장특성을 가지게 할 수 있다. 예를 들면 단일경로이득이 3dB인 MQW를 FPI 구조로 할 경우, 최대이득 10.1dB, 동작파장대역이 4.6nm의 특성을 가지도록 할 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

This paper analyzes and assesses the gain of optically pumped surface-normal MQW optical amplifiers. The proposed amplifiers have the advantage of polarization independence, high coupling efficiency to and from optical fibers, and flexibility of operating wavelength. We analyzed the gain characteristics of 100 - 200-period MQWs and verified the dependence of a strained lattice and selective doping. Theoretical analysis of such MQWs shows a single-pass gain of 3 dB with broad operation bandwidth. A single-pass gain of 2.6 dB is obtained experimentally in an InGaAs/InGaAlAs MQW amplifier, which is compared with calculations. The use of Fabry-Perot interferometer (FPI) structure in an optical amplifier is a useful way to increase the gain, but causes a problem of narrow operation bandwidth when the single-pass gain is low. Therefore, a single-pass gain above 2 to 3 dB is a prerequisite to achieve both a high gain and moderate operation bandwidth in FPI-structured optical amplifiers. We have designed an FPI-structured surface-normal optical amplifier both with a high gain of broad operation bandwidth of 4.6nm, when a single-pass gain is 3 dB.

I. 서론

FTTH(Fiber To The Home)망의 구성을 위해서는 여러 가지 광소자들을 효율적으로 광섬유계에 집적하는 기술이 필요하게 된다. 이를 위해서는 광

소자를 lens free, alignment free로 광섬유에 일괄 접속하는 기술, 즉 vertical photonics^[1]기술이 유용한 수단이 된다. 본 논문에서 제안한 면형 광증폭기는 이러한 vertical photonics에 적합한 소자이며, 다음과 같은 응용이 기대되고 있다.

* 한국통신 가입자망연구소(woonha@kt.co.kr)

** 충북대학교 컴퓨터공학과

논문번호: 99319-0811, 접수일자: 1999년 8월 11일

- 1) 광가입자망에서의 분기손실의 보상
- 2) 광소자의 집적화에 따른 삽입손실의 보상

이상의 응용목적들을 위한 광증폭기는 소형이면서 10dB정도의 이득을 갖는 것이 바람직하다. 지금까지 주로 사용되어온 광증폭기는 Er, Pr 등 희토류원소 첨가 광섬유형 광증폭기와 반도체레이저 증폭기로 나눌 수 있다. 반도체레이저 증폭기는 EDFA 등 광섬유형 증폭기에 비해 소형이며, 동작파장의 자유도가 크다는 이점이 있는 한편, 다음과 같은 문제점이 존재한다.

- 1) 활성영역이 좁아 광섬유와의 결합에 제약이 따른다.
- 2) 특별한 구조를 갖지 않는 한, 이득의 편광의존성이 존재한다.

이상의 문제점들은 변형 구조일 경우 원천적으로 발생하지 않게 된다. MQW 변형 광증폭기의 경우, 충분한 이득을 얻기 위해서는 다수의 well층($10^2 \sim 10^3$)이 요구된다. 이와 같이 많은 층의 MQW를 동작시키기 위해서는 MQW 전체를 충분히 여기시키는 것이 중요한 과제가 된다. 그러나 전류여기 방식은 barrier의 전위장벽으로 인해 MQW 전체를 균등하게 여기시키는 것이 곤란하게 된다. 광여기는 전류여기에 비해 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- 1) MQW의 barrier는 여기광에 대해 투명하기 때문에 전체의 well을 균등하게 여기시키는 것이 가능하다.
- 2) Joule 손실에 의한 발열의 문제가 없다.

또한 최근 EDFA 기술의 진보에 따라 소형이면서도 고출력의 여기용 LD를 손쉽게 구할 수 있다. 전류여기 대신 충분한 이득을 얻기 위해서 광여기 방식을 이용한 것이 본 논문의 새로운 시도라고 할 수 있다. (그림1)은 우리들이 제안한 광여기 MQW 변형 광증폭기의 구조를 나타내고 있다. 매립층에 의한 캐리어 확산 영역제한과 코어확대(TEC) 광섬유와의 접속, 그리고 방열장치의 부착 등은 후속 연구로 수행할 예정이다. 활성층은 다중반사에 의해 이득을 높이기 위하여 FPI 구조로 하였다. FPI 구조에서 단일경로이득이 낮으면 넓은 동작파장대역과 높은 이득을 동시에 얻기가 곤란하다. 본 연구에서

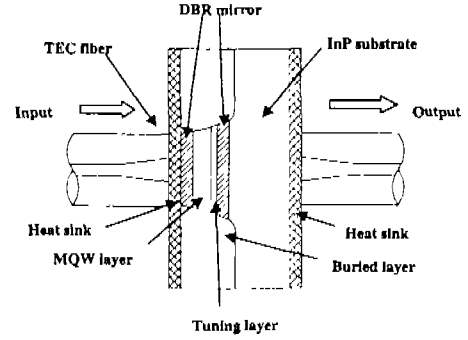


그림 1. 광여기 MQW 변형 광증폭기의 구조

는 우선, MQW의 단일경로이득을 높이기 위한 MQW의 설계조건 및 변형 광증폭기의 시제품제작 결과에 대하여 서술하였다. 다음으로 변형 광증폭기의 활성층을 FPI 구조로 하였을 때, 고이득과 광대역성을 동시에 충족시킬 수 있음을 보였다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 서론에 이어 제2장에서는 제안한 광증폭기의 동작해석을 위한 MQW 모델에 대하여 기술하였고 제3장에서는 각 MQW 해석모델에 대한 이득계산 및 실제 제작한 변형 광증폭기의 이득측정결과에 대하여 서술하였다. 그리고 제4장에서는 높은 이득과 적절한 동작파장특성을 갖기 위한 FPI의 설계조건에 대하여 기술하였다. 마지막으로 본 논문의 결론을 제시하였다.

II. 해석모델

(그림2)는 quantum well의 기본 subband에 대한 모식도를 나타내고 있다. 여기광 ν_p 에 의해 전자, 정공쌍이 발생한다. 전자, 정공은 각각의 밴드내의 의사 페르미 준위(E_{ef} , E_{hf})를 중심으로 Fermi-Dirac 분포를 이룬다. 그 과정에서 잉여에너지는 열로 방사된다. 여기광 ν_p 를 흡수하여 신호광 ν_s 에 대해 이득을 가질 수 있는 조건은

$$h\nu_s < E_{ef} - E_{hf} < h\nu_p \quad (1)$$

이다^[5].

일반적으로, 화합물매질 가운데에 어떠한 여기방법에 의해 전자, 정공쌍을 발생시키면, 여기된 많은 수를 전자의 의사 페르미 준위는 전도대의 낮은 상태밀도로 인하여 비교적 간단히 전도대 안으로 이동한다. 그러나, 정공의 의사 페르미 준위는 가전

자대의 높은 상태밀도로 인하여 가전자대 안으로 이동하기가 어려워진다.

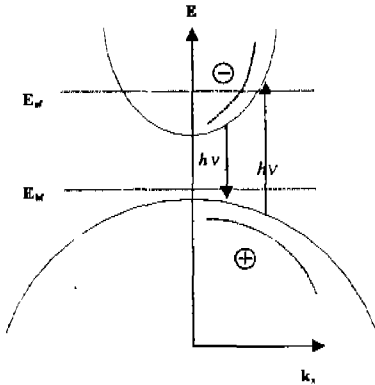


그림 2. Quantum Well의 기본 Subband 모식도

그 결과, 식(1)을 만족하기 위해서는 대단히 큰 여기 power가 필요하게 된다. 따라서, 높은 효율의 광증폭기를 실현하기 위해서는 다음과 같은 방법을 상정할 수 있다.

- 1) 왜곡격자MQW를 채용하는 것에 의해, 가전자대 정상부근에서 정공의 상태밀도를 작게 하여 정공의 의사 페르미 준위의 이동이 쉽게 일어나도록 한다.
- 2) MQW의 장벽층에 p형 불순물을 선택적으로 도핑 후, 확산에 의해 정공을 우물층에 공급하여, 정공의 의사 페르미 준위가 식(1)을 만족할 수 있도록 한다.

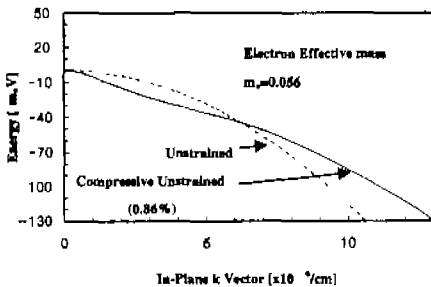


그림 3. 면형 광증폭기의 해석모델로 사용한 InGaAsP 우물층($\lambda_g=1.58\mu\text{m}$)과 InGaAsP 장벽층($\lambda_g=1.30\mu\text{m}$)으로 구성된 양자우물의 Heavy Hole(HH1) Subband

(그림3)은 면형 광증폭기의 해석모델로 사용한

InGaAsP 우물층($\lambda_g=1.58\mu\text{m}$)과 InGaAsP 장벽층($\lambda_g=1.30\mu\text{m}$)으로 구성된 양자우물의 heavy hole (HH1) subband이다. 점선은 Luttinger-Kohn Hamiltonian 계산에 의해 구한 0.86%의 압축왜곡격자 양자우물에 대한 값이다^[7]. 비교를 위해 2개의 모델은 같은 bandgap energy와 같은 전도대 구조 ($m_e^*=0.056$)를 가지는 것으로 가정하였다. 우리들은 (그림3)의 2개의 밴드구조를 바탕으로 하여 이득의 격자왜곡 의존성 및 선택도평의존성에 대한 검토를 행하였다. <표1>은 해석 모델로 선택한 MQW의 우물과 장벽의 구조를 나타내고 있다.

표 1. MQW의 우물과 장벽의 구조

	Strain	Selective - Doping (cm ⁻²)	Material
well	0 +0.86 (compressive)	-	InGaAsP ($\lambda_g=1.58\mu\text{m}$)
barrier	0	p = 3 x 10 ¹¹ p = 1 x 10 ¹² p = 3 x 10 ¹²	InGaAsP ($\lambda_g=1.30\mu\text{m}$)

III. MQW의 동작해석 및 이득측정

우리들은 면형 광증폭기에서 광여기에 의해 발생한 전자,정공쌍의 재결합 과정을 다음과 같이 상정하여 계산하였다.

- 1) 광여기된 높은 에너지의 전자,정공이 각각의 의사 페르미 준위에 도달하기까지 소진되는 평균에너지는 격자의 열진동으로 전환된다. 그리고 의사 페르미 준위 부근에 도달한 전자, 정공은 직접형의 자연방출로 없어지는 부분과 신호광을 증폭시키기 위한 유도방출로 없어지는 부분으로 나누어진다.
- 2) 왜곡격자의 Auger억제효과^[8]를 고려해, Auger 효과로 대표되는 밴드간 비발광 천이는 무시하였다.
- 3) 또다른 재결합 mechanism인 결정의 표면, 계면의 결함 등에 의한 비발광 재결합은 에피성장기술 및 passivation기술의 진전에 따라 무시할 수 있는 것으로 가정하였다.

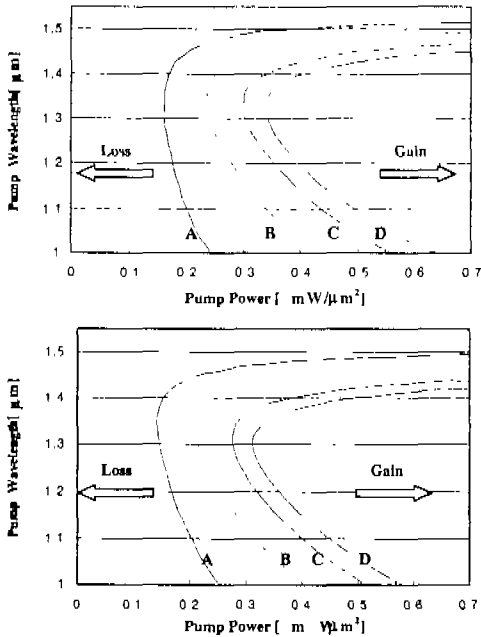


그림 4. 여러 가지 Pump Power와 여기 광선의 파장에 대한 단일 Quantum Well의 0.25% 이득 곡선 (A : 3x10¹²cm⁻², B : 1x10¹²cm⁻², C : 3x10¹¹cm⁻², D : Undoped)의 P형 선택 도우핑의 경우
 a) 비외곽 격자 Quantum Well
 b) 0.86%의 압축외곽 격자 Quantum Well

후술하는 바와 같이, 우리들은 실험에 의해 해석 결과와 거의 같은 단일경로이득을 얻을 수 있었다. 따라서 우리들이 무시한 위 2), 3)항의 효과는 우리들의 실험을 통하여 이득에 그다지 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있었다.

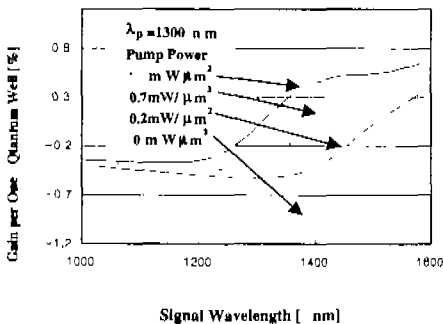


그림 5. 0.86%의 압축외곽격자와 P=3x10¹²cm⁻²의 선택도우핑을 가진 단일 Quantum Well 이득의 파장 의존성

MQW의 한 주기당의 이득(g_0L)계산을 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$g_0L = \alpha_0 L \cdot \frac{1 - \exp\left[\frac{h\nu_s - (E_{ef} - E_{ef})}{k_B T}\right]}{\left\{1 + \exp\left(\frac{E_{e1}(k) - E_{e1}}{k_B T}\right)\right\} \left\{1 + \exp\left(\frac{E_{h1} - E_{h1}(k)}{k_B T}\right)\right\}} \quad (2)$$

여기서 α_0 는 MQW의 한 층당 흡수계수, L 은 우물층의 두께, $h\nu_s (= E_{e1}(k) - E_{h1}(k))$ 는 신호광의 광자 에너지, k_B 는 볼츠만 정수, E_{e1} , E_{h1} 는 각각 전자와 정공의 의사 페르미 준위이다. 의사 페르미 준위의 계산에 있어서, 캐리어의 재결합 수명 τ 는 파수 k 에 독립적으로 일정하다고 가정하였다. 그리고 측정된 MQW의 흡수계수로부터 τ 의 값($\tau = 0.64\text{ns}$)을 구하였다. (그림4)는 격자외곽이 있는 MQW와 그렇지 않은 MQW에 대해 여기광의 파장과 power를 가변량으로 하고, 밴드갭 파장의 신호광에 대해 한 층의 양자우물당 0.25%의 이득을 얻을 수 있는 조건을 나타내고 있다. 이 결과로부터 변형 광증폭기의 이득향상에 기여하는 선택적 도우핑과 격자외곽의 효과를 확인할 수 있다. (그림4)에 나타난 각각의 곡선의 우측부분이 이득영역, 그리고 좌측부분이 손실 영역이다. 이 계산에 있어서 우리들은 MQW의 증폭영역의 형상을 단일모드 광섬유의 mode field에 해당하는 직경 12 μm 의 원형을 가정하였다. (그림5)는 3x10¹²/cm²의 선택도우핑과 0.86%의 압축외곽격자 MQW의 한 층당 이득의 파장의존성을 나타낸다. 광의 세기 0.7mW/ μm^2 , 파장 1.3 μm 의 여기조건에서 1.55 μm 의 신호광의 이득은 0.57%였다. (그림6)은 양자우물수에 따른 MQW의 단일경로이득과 여기광 출력의 감쇄를 나타낸다. 여기광의 세기가 0.7mW/ μm^2 일 때, 전체 우물의 두께 1.2 μm 에 상당하는 190층의 양자우물에 의해 3dB의 단일경로이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 정도 주기의 MQW의 성장이 가능하다는 것을 이미 우리가 사용

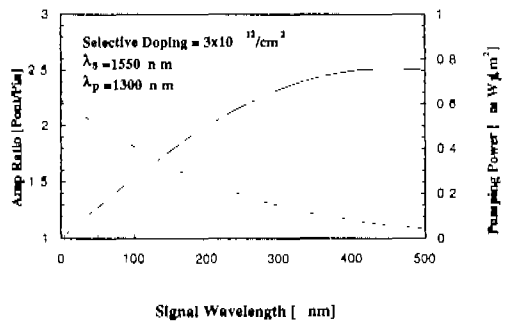


그림 6. 양자우물수에 따른 MQW의 단일경로이득과 여기광 출력의 감쇄

한 MBE 장치로 실증한 바 있다. 이어서, 아래와 같은 가정 하에서 MQW의 예상 발열량을 조사하였다.

- 1) 자연방출광의 재흡수는 무시한다.
- 2) MQW의 양면은 실온에 고정되어 있다.
- 3) 우물, 장벽층의 열저항율은 같은 조성비의 bulk 값의 평균치(20[KcmW⁻¹])^[8]를 취한다.

(그림6)과 같은 3dB의 이득을 얻기 위해 필요한 190주기 MQW의 온도상승은 9.3°C로 매우 낮은 값을 알 수 있었다. (그림7)은 MBE 장치(VG, V80H-MKII)로 제작한 prototype 100주기 MQW 면형 광증폭기의 분광투과특성을 나타내고 있다. 이 MQW는 0.5%의 입축왜곡을 갖는 8.5nm의 InGaAs 우물(E_g=0.68eV)과 0.34%의 신장왜곡을 갖는

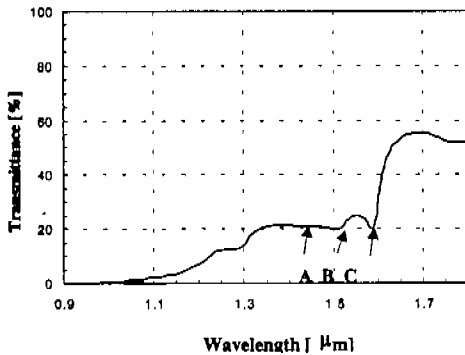


그림 7. MBE장치로 제작한 Prototype 100주기 MQW 면형 광증폭기의 분광투과특성. A-C영역은 가변파장 레이저의 측정대역이며 B-C영역은 이득측정 영역임.

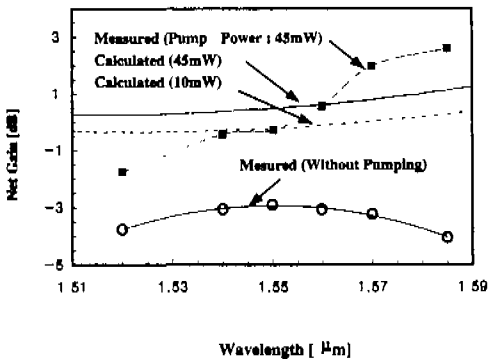


그림 8. 여러가지 신호파장에 대한 MQW이득의 계산 및 측정치. 신호광의 출력은 -20dBm이며 여기광의 출력은 45mW임. (λ₀=1.43μm)

12.6nm의 InGaAlAs 장벽으로 구성되어 있다. (그림8)은 (그림7)의 prototype 면형 광증폭기의 신호광의 파장에 대한 이득측정 결과를 나타내고 있다. 신호광이 exciton 파장 부근의 1.585μm에서 2.6dB의 단일경로이득을 얻었다. 우리들은 이 결과로부터 Auger나 표면결함 등에 의한 비발광 재결합이 왜곡 격자 MQW의 이득에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다.

IV. FP 공진기의 동작해석

면형 광증폭기를 FPI 구조로 하는 것은 이득을 높이기 위한 하나의 방법이다. 그러나, MQW의 단일경로이득이 낮은 경우는 FPI 구조에서 feed-back을 높여 이득을 높여도 동작파장대역이 대단히 좁아지는 문제가 존재한다. 따라서 FPI 구조에 의해 면형 광증폭기가 높은 이득과 넓은 동작파장대역을 갖기 위해서는 우선, 수dB정도의 단일이득경로를 갖는 MQW가 필요하다. 다음으로, FPI mirror는 증폭효율을 높이기 위해 여기광의 파장에 대해서는 무반사, 그리고 넓은 동작파장대역을 위해 신호광의 파장에 대해서는 넓은 반사율이 요구된다. 이 장에서는 높은 이득특성과 넓은 동작파장대역을 갖는 면형 광증폭기를 실현시키기 위한 FPI 설계에 관한 검토를 행하였다. 식(3)은 단일경로이득을 갖는 MQW의 양단에 power 반사율 R의 동일한 두개의 mirror가 있을 때 광증폭기의 이득(G)를 나타내고 있다.

$$G = 10 \log_{10} \left[\frac{g(1-R)^2}{1 + R^2 g^2 - 2Rg \cos\left(\frac{4\pi n d}{\lambda}\right)} \right] \text{ [dB]} \quad (3)$$

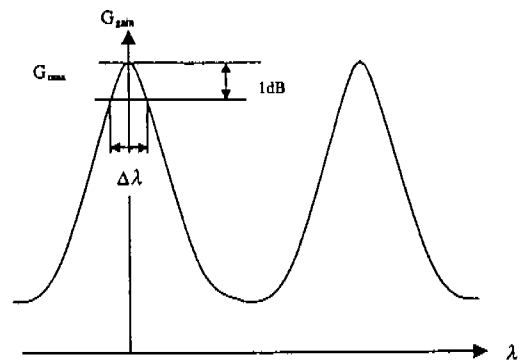


그림 9. 동작파장대역(Δλ)과 최대이득(Gmax)의 경우

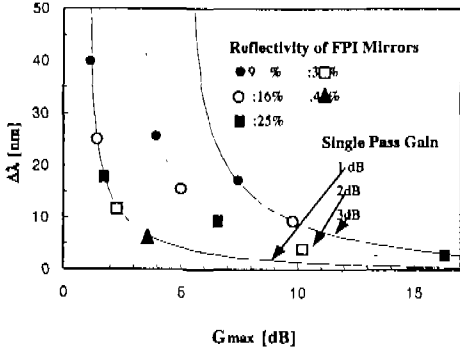


그림 10. FPI mirror의 반사율과 MQW의 단일경로이득에 따른 최대이득(G_{max})과 동작파장대역($\Delta\lambda$)과의 관계

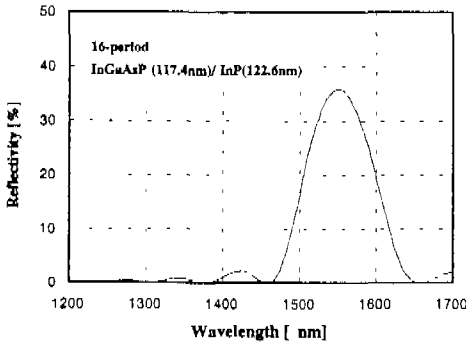


그림 11. 신호광 파장이 $1.55\mu\text{m}$, 여기광 파장이 $1.45\mu\text{m}$ 라 하고, 신호광에 대한 Power의 반사율이 36%, 여기광에 대해 거의 무반사 특성을 갖는 16주기 InGaAsP/InP mirror의 설계 예

여기서, n 은 굴절률, 그리고 d 는 공진기 길이이다. 설계를 간단하게 하기 위해서는 mirror는 여기광에 대해 반사율이 낮은 것이 바람직하다. 본 논문에서는 공진기 길이를 3dB의 단일경로이득을 갖는 MQW에 대해 $1.55\mu\text{m}$ 의 공진파장을 얻을 수 있는 최소길이인 $4.15\mu\text{m}$ 으로 하여 계산하였다. 그 때 FP 공진기의 FSR(Free Spectral Range)은 86.1nm 이다. 우리들은 변형 광증폭기의 동작파장영역($\Delta\lambda$)과 G_{max} 를 (그림9)와 같이 정의하였다. (그림10)은 mirror의 반사율에 의한 $\Delta\lambda$ 와 G_{max} 의 관계를 나타내고 있다. 이 결과로부터 MQW의 단일경로이득이 3dB이고 mirror의 power반사율이 36%일 때, 변형 광증폭기는 4.6nm 의 비교적 넓은 동작파장영역($\Delta\lambda$)을 가지면서 10.1dB의 높은 이득(G_{max})을 가질 수 있음을 알 수 있다. (그림11)은 신호광 파장

이 $1.55\mu\text{m}$, 여기광 파장이 $1.45\mu\text{m}$ 라 하고, 신호광에 대한 power의 반사율이 36%, 여기광에 대해 거의 무반사 특성을 갖는 16주기 InGaAsP/InP mirror의 설계 예이다. 또한 설계대로의 mirror가 실현 가능함을 확인하였다. 여기서 우리들은 InP과 InGaAsP의 굴절률을 각각 3.16과 3.30으로 하여 계산하였다 [9].

V. 결론

광여기 MQW 변형 광증폭기를 제안하고, 그 동작특성을 이론적으로 분석하였다. 제안된 광증폭기는 향후, 광가입자계의 중요한 소자로서 응용이 기대된다. 해석결과, 0.86% 의 압축격자왜곡과 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 의 선택도우핑이 존재하는 190주기 MQW에 대해 여기 power가 $0.7\text{mW}/\mu\text{m}^2$ 일 때 3dB의 단일경로이득을 얻을 수 있음을 알았다. 또한, MBE 장치로 제작한 100주기의 MQW에서 2.6dB의 높은 단일경로이득을 얻었다. 그리고, 일반적으로 FPI 구조 변형 광증폭기에서 높은 이득과 넓은 동작파장대역의 두 가지 특성을 동시에 갖도록 하는 것은 어려운 것으로 알려져 왔으나, 우리들은 단일경로이득 3dB의 MQW를 FPI 구조로 하는 것에 의해 10.1dB라는 높은 최대이득과 4.6nm 라는 넓은 동작파장대역을 갖는 변형 광증폭기의 실현이 가능하다는 것을 제시하였다.

참고 문헌

- [1] S.Kawakami, O.Hanaizumi and T.Sato, "Vertical Photonics - Direct integration of photonics device into optical fiber", OEC'94, 14A2-1, pp.120-121, 1994.
- [2] M.Ohashi, S.Hamasaka, M.Kushibe, S.Inoue, G.Hatakoshi and M.Nakamura, "First measurement of a single pass gain through a vertical transmission optical amplifier", IOOC'95, ThD3-5, 1995.
- [3] K.T. Jeong, O.Hanaizumi, S.Kashiwada, I. Syuaib, K.Kawase and S.Kawakami, "Fabrication and Verification of optically pumped Surface-Normal Optical Amplifier", Tech. Report of IEICE OPE95-110, pp.79-84, 1995.
- [4] O.Hanaizumi, K.T. Jeong, S.Kashiwada,

I.Syuuib, S.Kawakami, "Observation of gain in an optically pumped surface-normal multiple-quantum-well optical amplifier", Optics Lett. 21, pp.269-271, 1996.

- [5] E.Yablonovitch and E.O.Kane, "bandstructure engineering of semiconductor lasers for optical communications", IEEE J.Lightwave Technol. vol 6, pp.1292-1299, 1998.
- [6] Y.Yoshikuni, Private communication.
- [7] T.Ishikawa and J.E.Bowers, "Band lineup and in-plane effective mass of InGaAsP or InGaAlAs on InP strained-layer quantum well", IEEE J.Quantum Electron. 30, pp.562- 570, 1994.
- [8] H.Nagai, S.Adachi and T.Fikui, III-V Mixed Crystals (Tokyo: Corona Publishing, 1998) Ch. 2.
- [9] A.J. Moseley, J.Thompson, D.J.Robbins and M.Q.Kearly, "High reflectivity AlGaInAs/InP multilayer mirrors grown by low pressure MOVPE for application to long wavelength high-contrast-ratio MQW modulations" Electron. Lett. 25, pp.171-178, 1998.

조 용 환(Yong-Hwan Cho)

정회원

현재 : 충북대학교 컴퓨터공학과 교수

e-mail : yhcho@cbucc.chungbuk.ac.kr

<주관심 분야> 멀티미디어 통신서비스, 정보통신망 계획

한국통신학회 논문지 제24권 4B호 참조

김 운 하(Woon-Ha Kim)

정회원

1980-1983 : 한국전자통신연구원

1984-현재 : 한국통신 가입자망연구소 가입자전송연구팀장

<주관심 분야> 가입자망 기술, 광전송 기술

한국통신학회 논문지 제22권 9호 참조

정 기 태(Ki-Tae Jeong)

정회원



1983 : 경북대학교 전자공학과 (학사)

1985 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (석사)

1996 : 일본 도호쿠대학(東北大學) 전자공학과 (박사)

1996년 5월~현재 : 한국통신 가입자망연구소 WDM 기술 연구실장

<주관심 분야> 특수광섬유, 광부품, 광선로