

반도체 광 증폭기용 Strained GaInAs/GaInAsP/InP 제작에 관한 연구

박 윤 호¹⁾, 홍 창 희²⁾

A Study on the Fabrication of the Strained GaInAs/GaInAsP/InP for Semiconductor Optical Amplifier

Yoon-Ho Park, Tchang-Hee Hong

Abstract

Semiconductor optical amplifiers(SOA) have been widely studied because of its flexibility compared to the fiber amplifiers. Besides their general purpose usage such as in line amplifiers, boosters, and pre-amplifiers in optical networks, SOA can offer nonlinear characteristics which can be applied to cross gain modulation(XGM), cross phase modulation(XPM), four wave mixing(FWM), and wave-length converters for the wavelength division multiplexing(WDM) systems.

In this study, the gain characteristics of the strained structure numerically and the optimized strained quantum well for the polarization insensitive SOA.

The peak wavelength of material gain was fitted to the photo luminescence experimental data.

The quantum well structures used in this calculation are consisted of three GaAs superlattice layers in GaInAs well. The lattice mismatch between GaAs and InP is 3.8%. The number of GaAs superlattice layers and their thickness

1) 한국해양대학교 전자통신공학과 박사과정 광전자 공학 전공

2) 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

determine the average strain of the well. At the GaAs superlattice layers, the increase of light-hole mass causes the slope of wave function to be more convex while the decrease of heavy-hole mass leads it to be more concave, and the heavy-hole envelop functions will suppressed in this results.

Therefore this structure enhances the TM mode gain coefficient with good efficiency because the light-hole band is lifted up whereas the heavy-hole band is lowered down. Additionally, it shows 3dB gain bandwidth of 100nm in $1.55\mu\text{m}$ wavelength system.

It shows design of the multi-layer anti-reflection(AR) coatings for optimum construction of broadband photonic devices, and also establishment of the optimum condition for the one-layer AR coating and multi-layer AR coatings. Ion-beam is used with electron-beam evaporation in the fabrication of multi-layer AR coating system.

The characteristics of semiconductor optical amplifier coated with SiO_2 and TiO_2 double layer have the reflectivity below 0.01% and 30nm wide bandwidth at $1.55\mu\text{m}$.

GaInAs quantum well structure having three GaAs superlattice layers and $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ double layer AR coatings proposed in this study are expected to be used in making a wide band polarization independent semiconductor optical amplifier practically.

1. 서 론

정보화 사회의 기본이 되는 정보를 빠른 시간에 많은 양을 정확하게 보내고 받을 수 있는 기술 중에 가장 각광을 받고 있는 기술이 광통신 시스템 기술이다. 그런데, 광통신 시스템의 고속 대용량 정보 전송 능력을 향상시키기 위해서는 정보를 광섬유에 실어서 장거리 전송을 할 경우에 생기는 선로 손실 또는 신호 분배 등에 의해 생기는 광 신호의 감쇠 등을 보완하기 위한 증폭기가 필요하게 된다.

신호를 증폭시키기 위한 종래의 방식은 광 신호를 전기 신호로 변환시켜 사용하는 재발진 증계기를 사용하였다. 그러나, 이는 광원인 반도체 레이저, 광 검출기와 함께 펄스 스라이싱, 재타이밍, 파형 정형을 위한 전자회로가 부가되므로 복잡

하며 저 효율적인 결과를 초래하였다. 그러나 이와 같은 변환을 하지 않고 광을 직접 증폭시키는 광 증폭기가 개발되면서 광통신은 새로운 기술적 혁신기에 들어 서게 되었다.

이러한 광 증폭기로는 반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier : SOA)와 에르븀 첨가 파이버 증폭기 (Er^{3+} -Doped Fiber Amplifier : 이하 EDFA)로 크게 나눌 수 있다.

그러나 EDFA의 경우 수장의 증폭도를 얻어내기 위해서는 수십m 이상이라는 상당히 긴 광섬유를 사용해야 되기 때문에 단거리 광통신이나 광 신호 처리 시스템에는 적용시키기 힘들다.

반면, 반도체 광 증폭기는 다른 소자와 쉽게 집적시킬 수 있고 스위칭, 무팅, 신호 맵핑, 펄스 형상 재변환 등과 같은 다양한 기능 형성이 가능한 장점을 가진다.¹⁰⁾ 편광 의존성을 가지는 단점이 있다. 따라서, 이러한 편광 의존성 문제만 해결한다면 반도체 광 증폭기는 EDFA에 비해 거의 비슷하거나 좋은 특성을 얻을 수 있고, 또한 반도체 광 증폭기만이 가지는 경제성과 시스템의 단순화 등으로 인해 향후, 반도체 광 증폭기는 광통신 시스템과 광학 집적회로에 있어서 아주 중요한 역할을 할 것으로 기대 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 편광 의존 문제의 해결 방법에 대해 연구하였다. 이를 해결하기 위한 방법으로 strain을 도입한 방법을 사용하였는데 지금까지 국내외적으로 연구되어진 tensile strain에 의한 방법은 TM 모드 이득을 높임으로써 편광 의존 문제를 해결할 수 있으나 그 피이크 파장이 단파장으로 이동되는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 파장과 편광 비의존성을 동시에 얻을 수 있는 새로운 구조가 필요하게 된다. 그래서 본 연구에서는 $1.55\mu\text{m}$ 파장을 가지는 GaInAs 양자 우물층을 사용하여 파장을 고정시키고 이 GaInAs 양자 우물층에 GaAs 초격자층을 삽입하여 tensile strain 효과를 가지게 함으로서 반도체 광 증폭기의 편광 의존성 문제를 해결할 수 있었다.

한편, 반도체 광 증폭기는 단면 반사율의 차이에 의해 FP형 반도체 광 증폭기와 진행파형 반도체 광 증폭기 두 그룹으로 나눌 수 있는데,¹¹⁾ 고 이득, 고 포화 출력과 함께 초광대역폭을 가지며 바이어스 전류, 온도, 단일 편광 등의 요동에 대해 크게 민감하지 않은 진행파형이 아주 유력한 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 특히 극히 넓은 이득 대역폭을 다중화 된 후의 여러 변조된 광 캐리어를 동시에 증폭하는 것이 가능하기 때문에 파장 분할 다중 시스템에서 아주 매력적인 증폭기로 될

수 있다.

이러한 진행과형 반도체 광 증폭기를 형성하기 위해서는 출력단 반사율을 줄이거나 없애기 위해 레이저 단면에 무반사 코팅기술이 필요하다. 이를 위해 현재 가장 많이 사용하고 있는 것이 다층막 무반사 코팅이다.

그러나 반도체에서 정확히 완전 무반사 조건을 만족하는 굴절률을 진공 챔버 내에서의 산소의 분압량을 조절하여 얻기란 증착과 동시에 표면 반사 특성 또는 반도체의 발광 특성을 측정하지 않고서는 불가능하다. 이와 같은 단점을 극복할 수 있는 코팅 방법이 다층막 무반사 코팅이다. 따라서, 본 연구에서는 다층막 무반사 코팅 중에서도 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 를 사용하여 이중층 무반사막 코팅을 제작하고 특성을 조사함으로써 10^{-4} 이하의 반사율에서 넓은 대역폭을 가지는 무반사막의 제작이 가능하였고, 이는 다른 무반사막 코팅 방법보다 비교적 제작이 간단하며 극저 반사율을 얻을 수 있는 것을 나타내었다.

이상과 같은 본 연구에서 제안한 편광 비의존 특성을 갖는 구조과 이중층 무반사막을 실제로 반도체 광 증폭기에 적용한다면 광통신 시스템에 사용될 수 있는 반도체 광 증폭기를 실현할 수 있을 것이다.

2. 본 론

GaInAs 양자우물을 사용하여 TE, TM 모드 이득을 같게 하기 위해 지금까지의 연구 결과들로부터 tensile strain을 걸게 되면 편광 비의존 특성을 얻을 수 있으나 이와 동시에 원하는 파장을 맞추는 것은 불가능하였다. 따라서 GaInAs 양자우물 구조의 밴드갭 에너지를 고정시키면서 TM 편광 성분의 이득특성을 높이기 위하여 그림 1과 같은 GaAs 초격자 구조가 포함된 양자우물 구조를 제안하고 그 이득특성을 계산하였다.

한편, 양자우물 구조에 있어서 TE, TM모드 이득계수를 결정하는 요소는 크게 2가지가 존재한다. 첫째로는 전도대와 heavy-hole대의 천이행렬과 전도대와 light-hole대의 천이행렬이 갖는 TE, TM 모드 전계에 의한 그 크기가 각각 다르기 때문이다.⁶⁾ 두 번째 이유는 heavy-hole과 light-hole이 그 질량에 따라 서로 다르게 양자화 되기 때문에 heavy-hole 밴드와 light-hole 밴드가 $k_{\perp}=0$ 인 점에서 다른 에너지 값을 갖게 되어, TE, TM 이득 특성이 달라지게 된다.

본 구조는 위의 두 원인 중에서 질량에 따라 heavy-hole과 light-hole이 서로

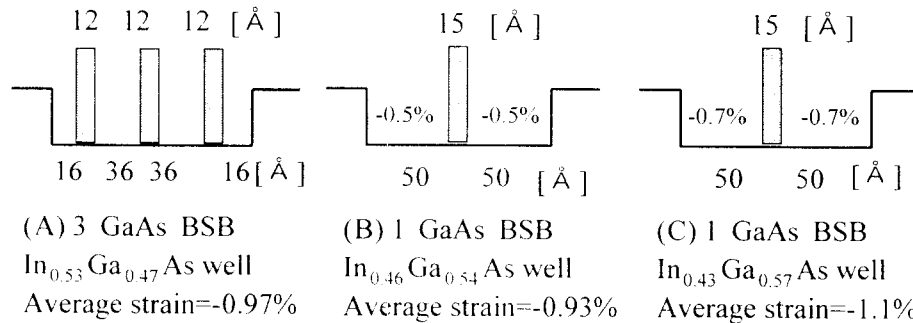
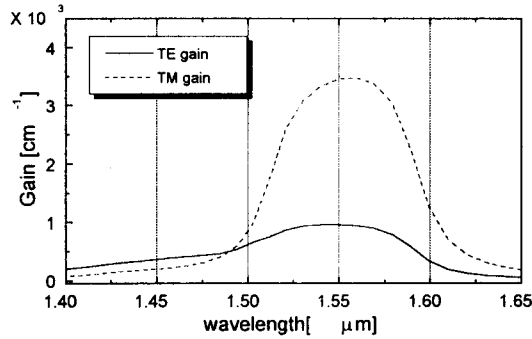


그림 1. GaAs 초격자층이 포함된 양자우물 구조

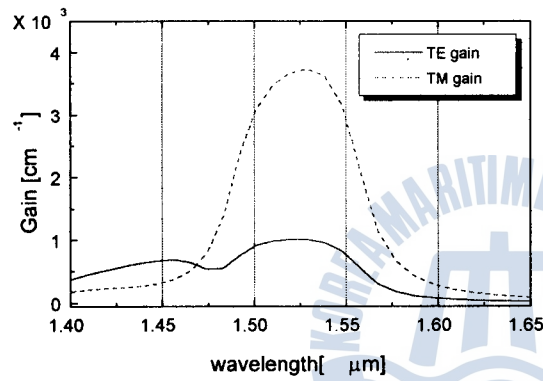
다른 밴드 구조를 갖는 성질을 이용한 구조이다. 먼저, TM 모드 이득을 크게 하기 위해서는 가전자대의 첫 번째 부밴드가 light-hole 밴드가 되어야만 한다.

그 이유는 다음과 같다. 양자우물 구조의 이득계수는 페르미 황금률에 따라 부밴드간에 천이되는 전자의 천이율에 의해서 결정되어진다. 이 천이율은 캐리어의 밀도에 의해서 결정되며 또한 캐리어는 열역학적으로 낮은 에너지 상태부터 채워지게 된다. 따라서 첫 번째 부밴드가 light-hole 밴드이고 heavy-hole 밴드와의 에너지 차이가 40meV 이상이 되어야 밴드 믹싱 효과를 줄이고 TM모드 이득계수를 크게 할 수 있다.

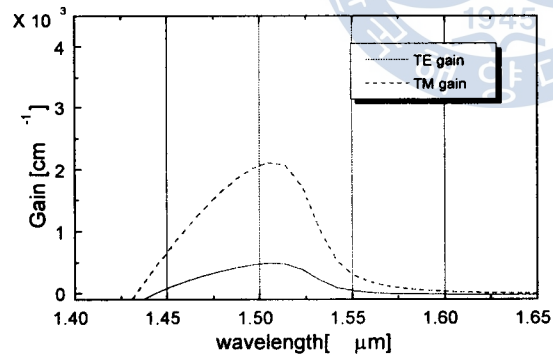
그림 1에 나타난 구조에서 초격자층은 GaAs로서 그 두께가 3 단층(monolayer (ML))이다. InP에 격자정합된 GaInAs와 GaAs의 격자크기는 GaInAs가 약 3.8% 더므로, GaAs는 약 3.8%의 tensile strain이 걸리게 된다. 따라서 첫 번째 부밴드는 light-hole 밴드가 된다. 그림 1의 구조 A에서 세 개의 GaAs 초격자 구조 중에서 가운데 위치한 것은 heavy-hole, light-hole 밴드의 짝수모드 포락선 함수를 위해, 양쪽의 두 개는 홀수모드 포락선 함수를 위해 각각이 피크가 되는 지점에 위치하게 하였다.



(a) GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물 구조



(b) GaAs 초격자층이 포함된 -0.5% strained GaInAs 양자 우물 구조



(c) GaAs 초격자층이 포함된 -0.7% strained GaInAs 양자 우물 구조

그림 2. GaAs 초격자층이 포함된 GaInAs QW구조의 이득특성 계산

그림 2에 그림 1의 세 구조에 대한 이득 특성을 나타내었다. 모든 계산에 있어서 가전자대 band offset은 160meV로 고정하였다. 세 구조를 공정하게 비교하기 위해서 세 구조의 TM모드 이득계수가 같아지도록 캐리어 밀도를 조정하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이 첫 번째 구조인 GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자

우물 구조가 3dB 이득 대역폭이 TE, TM 모드 동일하게 100nm로 가장 넓은 것을 알 수 있다.

따라서 넓은 파장영역에서 편광에 의존하지 않는 이득계수를 갖는 양자우물 구조의 반도체 광 증폭기는 그림 1의 A 구조인 GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조를 택하면 실현할 수 있다.

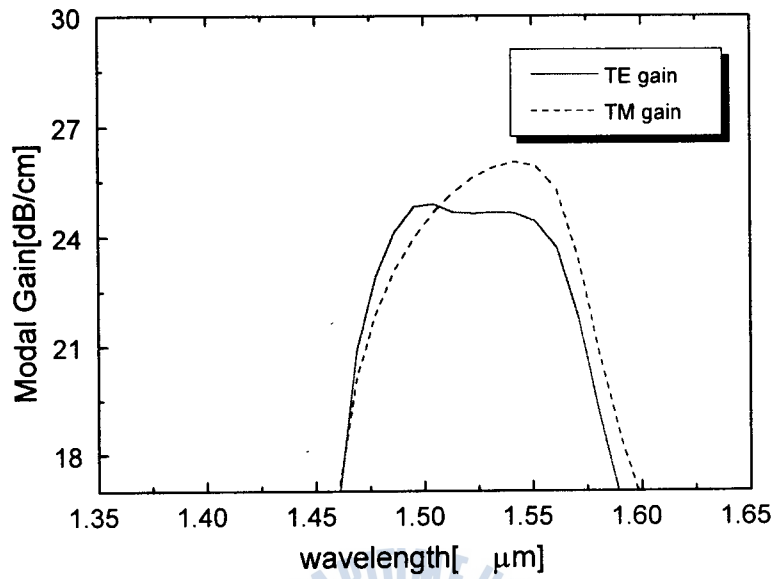
그림 3에 GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조(a)와 문헌[7]에서 최적의 tensile strain 양으로 제시된 -1.6% tensile strain이 인가된 양자우물 구조(b)의 이득특성을 비교하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조(a)의 3dB 이득 대역폭은 TE, TM모두 동일하게 100nm이고 (b)의 3dB 이득 대역폭은 TE모드는 62nm, TM 모드는 80nm로서 구조 (a)가 더 크다.

결과적으로 GaAs 초격자층을 도입한 구조에 대한 이론적인 계산에 의하면 GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조의 3dB이득 대역폭이 TE, TM 모두 100nm로 세 가지 구조 중에서 가장 넓으며, 광대역 파장 분할 다중화 시스템에 적용될 수 있는 반도체 광 증폭기에 알맞은 양자우물 구조로 사용될 수 있다는 것을 알 수 있으며, 또한 포락선 함수가 영향을 가장 많이 받을 수 있는 위치에 국부적으로 많은 양의 tensile strain을 인가하면 양자우물 전체에 인가하는 구조보다 더 효율적임을 알 수 있다.

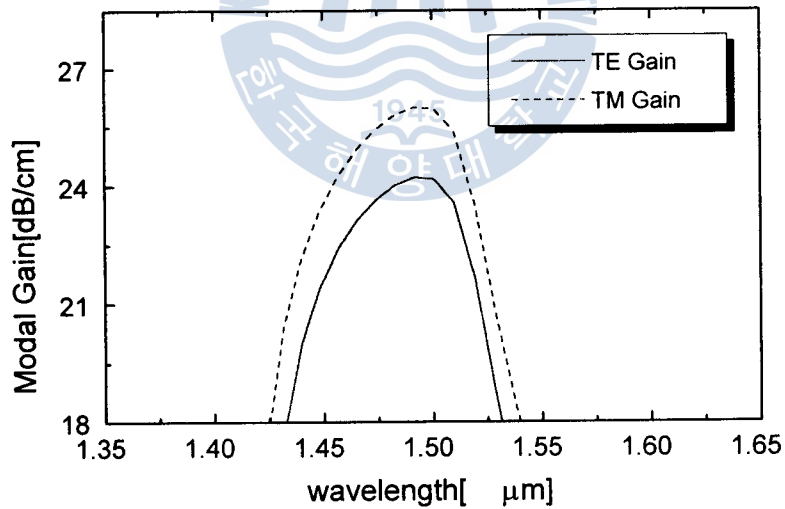
초격자층이 3층 포함된 GaInAs/GaInAsP/InP 구조에 대한 계산치를 CBE (Chemical Beam Epitaxy) 성장을 통해 실험적으로 확인하였다. 그리고 그 상온 광 여기 발광 특성(photoluminescence, PL)을 그림 4에 나타내었다. 계산치와 같은 15500Å 근처에서 TE, TM 피이크 파장이 나옴을 확인할 수 있었다.

한편, 양질의 반도체 광 증폭기를 위해 단면에 극저 반사율을 갖는 무반사막이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 TiO_2 와 SiO_2 를 사용하여 이중층 무반사 코팅을 하고 반도체 광 증폭기를 제작하여 이중층 무반사 코팅의 성질을 조사하였다. 이를 위해 1.55 μm GaInAs/GaInAsP 다중 양자우물 반도체 레이저 다이오드(길이:400 μm , 문턱전류:13mA) 단면에 TiO_2 와 SiO_2 를 차례로 이중 무반사 코팅을 하였다.

TiO_2 와 SiO_2 이중층 무반사 코팅은 e-beam evaporator를 사용하여 증착하였으며, TiO_2 와 SiO_2 막막의 증착 속도는 0.2nm/s와 0.8nm/s였다. TiO_2 와 SiO_2 의 두께와 굴절률은 분광 타원 해석기로 측정하였다. 반도체 광 증폭기 앞쪽 단면 각각의 두께는



(a) GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조



(b) -1.6% tensile strained 양자 우물층 구조

그림 3. GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조(a)와 -1.6% tensile strained 양자 우물층의 이득특성

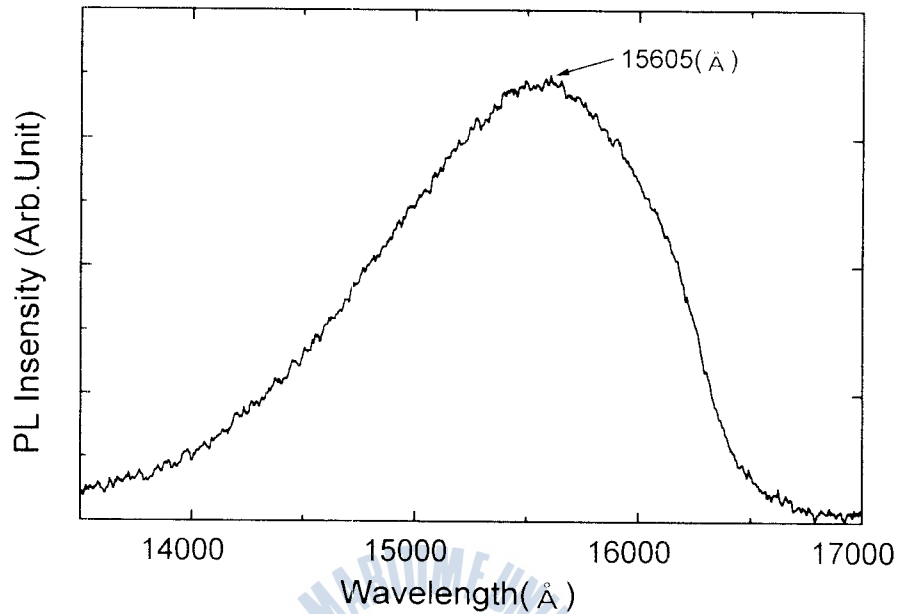


그림 4. GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs QW의 상온 광여기 발광 특성

123.5 ± 0.5nm와 220.3 ± 0.7nm이고 굴절률은 2.307과 1.448이었으며, 이 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 계산된 이중층 무반사 코팅과 TiO₂와 SiO₂로 코팅된 이중층 무반사막을 분광 타원 해석기로 측정한 반사 스펙트럼이다. 그림에서 알 수 있듯이 두께와 굴절률 오차는 1%이하로 양질의 이중 무반사 코팅이 되어 있다. 따라서 제작된 광 증폭기 단면 반사율은 30nm 이상의 대역폭을 갖고, 단면 반사율이 2×10^{-4} 정도임을 알 수 있다.

그림 6은 임계전류 이하($I = 10\text{mA}$)에서 TiO₂와 SiO₂ 이중층으로 코팅되기 전과 후의 증폭된 자연 방출(ASE) 스펙트럼을 나타낸다. 측정 결과, 무반사막을 코팅한 후에 광진 특성이 없어졌음을 알 수 있고 ripple이 매우 적은 ASE 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

그림 7은 제작된 반도체 광 증폭기에 전류를 10mA부터 40mA까지 주입했을 때의 ASE 스펙트럼을 측정 한 것이다.

전류를 증가시키기에 따라 ripple이 거의 없고, ASE 스펙트럼의 피크가 반도체 광 증폭기의 전류 주입에 의해 전자가 증가함으로 blue-shift함을 볼 수 있으며 좋은 특성을 갖는 무반사막이 제작되었음을 알 수 있었다.

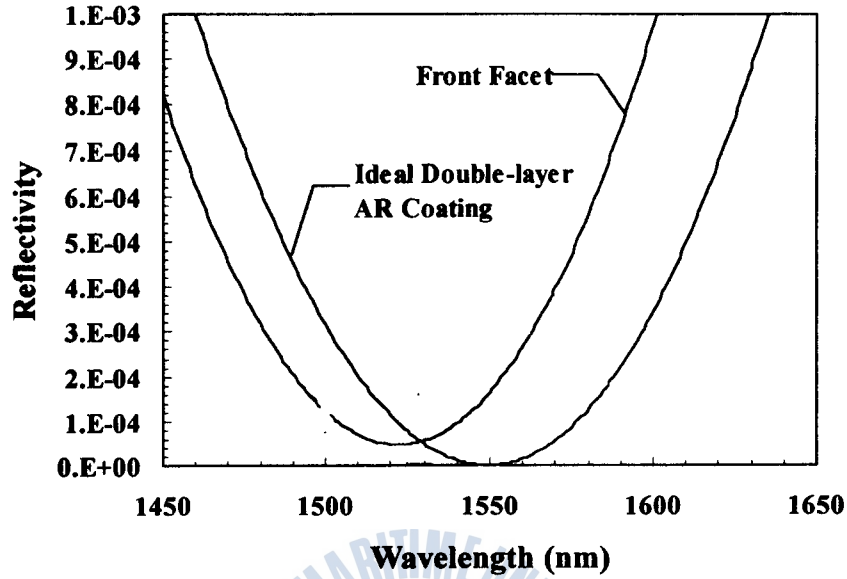


그림 5. 계산된 이중층 무반사 코팅과 TiO_2 와 SiO_2 로 코팅된 이중층 무반사막을 분광 타원 해석기로 측정한 반사 스펙트럼

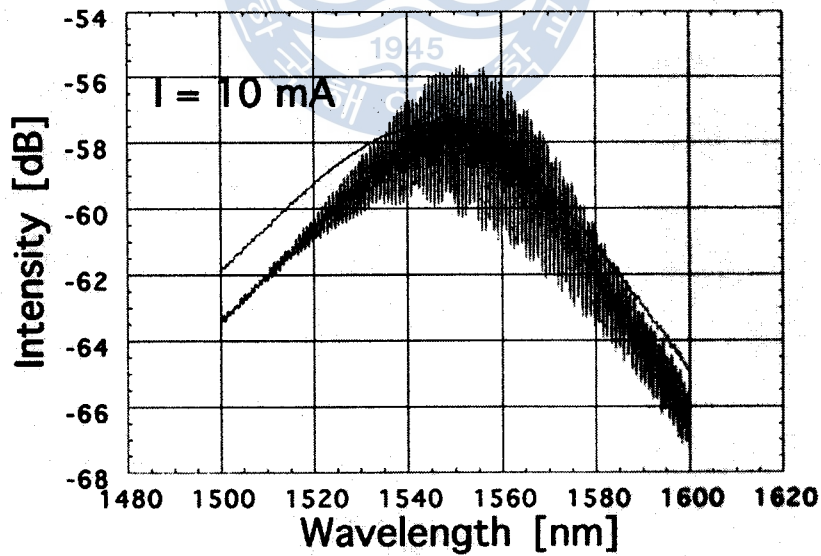


그림 6. TiO_2 와 SiO_2 이중층의 코팅되기 전과 후의 증폭된 자연 방출 스펙트럼

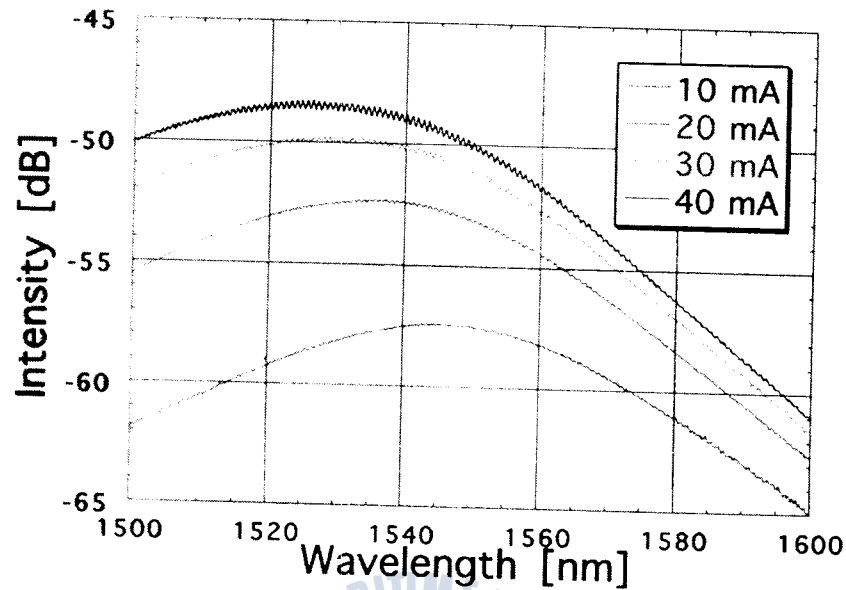


그림 7. 전류 증가에 따른 증폭된 자연 방출 스펙트럼

본 연구 결과 수십 nm의 대역폭을 가지며, 이득이 20dB 이상 되는 반도체 광 증폭기를 제작하기 위해서는 단일층 무반사 코팅보다는 이중층 무반사 코팅이 좋은 것을 알 수 있었다. 이와 같은 이중층 무반사 코팅은 극저 반사율과 넓은 대역폭을 필요로 하는 파장 변환기, 외부 공진기 모드 잠김 레이저 다이오드 및 광 스위칭과 같은 광기능 소자에 필요한 조건을 만족시킬 수 있다.

3. 결 론

편광 비의존 특성을 가지는 반도체 광 증폭기 개발을 위해 지금까지와는 다른 새로운 방법인 GaInAs 양자 우물에 GaAs 초격자를 삽입한 구조를 사용하여 계산한 결과, GaAs 초격자가 3층 포함된 구조에서 3dB 이득 대역폭이 TE, TM 모두 100nm로 매우 넓은 대역폭과 편광 비의존 특성을 함께 가지는 구조를 얻어낼 수 있었다.

이러한 GaInAs 양자 우물에 GaAs 초격자를 삽입한 구조의 이론적 이득 특성의 결과는 반도체 광 증폭기의 설계에 있어서 아주 중요하며, 또한 광대역 파장 분할 다중화 시스템에 적용될 수 있는 반도체 광 증폭기에 알맞은 구조로 사용될

수 있다.

또한, 이 구조의 특성을 확인하기 위하여, CBE로 GaAs 초격자층이 포함된 양자 우물층을 가지는 구조에 대해서 성장을 하였다. 그 결과, GaAs 초격자층이 3층 포함된 구조에 대한 상온 광여기 발광 특성은 계산치와 같은 15500Å 근처에서 피이크 파장이 나옴을 확인할 수 있었다.

한편, 광대역 시스템에 사용되는 반도체 광 증폭기는 넓은 대역폭을 가져야 한다. 그러기 위해서는 무반사막 코팅 기술이 중요한데, 본 연구에서는 현재 10^{-4} 이하의 극저 반사율을 얻기 위해 주로 사용되고 있는 제작이 비교적 복잡한 삼중층 이상의 무반사막이 아닌, 제작을 간단하게 하기 위해 이중층 무반사막을 사용하였다. 이중층 무반사막의 재료로서는 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 를 사용하였다. 그리고 이를 1.55 μm 반도체 레이저 다이오드에 코팅한 결과, 단면 반사율이 2×10^{-4} 이며 30nm의 무반사 대역폭을 갖는 반도체 광 증폭기를 제작할 수 있었다. 제작된 반도체 광 증폭기의 특성으로부터 이중층 무반사 코팅으로도 충분히 좋은 반도체 광 증폭기 특성을 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다.

이와 같은 다층막 무반사 코팅 기술은 넓은 파장 대역폭과 극저 반사율을 동시에 갖는 광소자 요구사항을 충족시킬 수 있을 뿐만 아니라, 새로운 기능을 갖는 광통신 시스템을 구성하는데 필수적 기술이 될 것이다.

향후, 본 연구에서 제안한 GaAs 3 초격자층이 포함된 GaInAs 양자 우물 구조와 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 이중층 무반사막 구조는 광대역 편광 비의존 반도체 광 증폭기의 제작에 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

- 1) M. J. O'Mahony, "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems," J. Lightwave Technol., vol. 6, pp. 531-544, 1988.
- 2) K. Y. Liou, U. Koren, E. C. Burrows, M. Oron, B. I. Miller, M. Young, G. Raybon and C. A. Burrus, "Operation of integrated InGaAsP-InP optical amplifier monitoring detector with feedback control circuit," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 870-880, 1990.
- 3) G. P. Agrawal and N. A. Olsson, "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in Semiconductor laser amplifiers," IEEE J.

- Quantum Electron., vol. 25, pp. 2297-2306, 1989.
- 4) K. T. Koai, R. Olshansky, and P. M. Hill, "Dual-function semiconductor laser amplifier in a broad-band subcarrier multiplexed system," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 926-928, 1990.
 - 5) M. J. O'Mahony, "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems," J. Lightwave Technol., vol. 6, pp. 531-544, 1988.
 - 6) Peter S. Zory, Jr., "Quantum Well Lasers," pp. 52-57, 1993.
 - 7) Peter J. A. Thijs, Luuk F. Tiemeijer, J. J. M. Binsma, and Teus van Dongen, "Progress in Long Wavelength Strained Layer InGaAs(P) Quantum-well Semiconductor Laser and Amplifiers," IEEE J. Quantum Electron. vol. QE-30, no. 2, pp. 477-499, Feb. 1994.



