

---

# 편광 비의존성 GaInAs/GaInAsP/InP 반도체 광 증폭기 구조에 관한 연구

박윤호\*, 강병권\*, 이 석\*, 조용상\*\*, 김정호\*\*\*, 황상구\*\*\*, 홍창희\*\*\*

## A Study on the Structure of Polarization Independent GaInAs/GaInAsP/InP Semiconductor Optical Amplifier

Yoon-Ho Park\*, Byung-Kwon Kang\*, Seok Lee\*, Yong-Sang Cho\*\*,  
Jeong-Ho Kim\*\*\*, Sang-Ku Hwang\*\*\*, Tchang-Hee Hong\*\*\*

### 요 약

본 논문에서는 편광 비의존 특성을 가지는 반도체 광 증폭기 개발을 위해 지금까지와는 다른 새로운 방법인 160(Å) 두께를 가지는 GaInAs 양자 우물에 GaAs Delta 층을 각각 1층, 2층, 3층을 삽입한 구조와 GaAs Delta 3층의 구조에서 Delta 층의 두께를 1 원자층에서 3 원자층까지 변화시켜 계산한 결과, 1 원자층 두께를 가지는 GaAs Delta 층이 3층 포함된 구조에서 3dB 이득 대역폭이 TE, TM 모두 85nm로 매우 넓은 대역폭과 편광 비의존 특성을 함께 가지는 구조를 얻어낼 수 있었다.

이러한 GaInAs 양자 우물에 GaAs Delta 층을 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.

---

※ 이 논문은 교육부 1997 반도체 분야 학술연구 조성비의 ISRC 광소자 부문 협동 연구과제(ISRC 97-E-3210) 연구비에 의해 연구되었음

\* 한국과학기술연구원 광기술연구센터

\*\* 연세대학교 전자공학과

\*\*\* 한국해양대학교 전자통신공학과

접수일자 : 1999년 10월

Abstract

In this study, the gain characteristics of the strained structures for SOA were calculated numerically and the optimized strained quantum well for the polarization-insensitive SOA was obtained. The structures used in this calculation were consisted of one, two, and three GaAs Delta layers respectively in the GaInAs(160 Å) well. Moreover the third one was calculated by changing from one mono-layer to three mono-layers in the thickness of GaAs delta layers. 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, The structure of the 3 GaAs delta layers(1 mono layer thickness) shows 3dB gain bandwidth of 85nm in 1.55 $\mu$ m wavelength system.

This study is expected to be used in making a wide band and polarization-independent semiconductor optical amplifier practically.

I. 서 론

정보화 사회의 기본이 되는 것은 많은 정보를 빠른 시간에 정확하게 보내고 받는 것이다. 이러한 것을 수행하는 기술 중에 가장 각광을 받고 있는 기술이 광통신 시스템 기술이다. 또한 광통신 시스템의 고속 대용량 정보 전송 능력을 더욱 향상시키기 위해서는 정보를 광섬유에 실어서 장거리 전송을 할 경우에 생기는 선로 손실, 신호 분배 등에 의해 생기는 광 신호의 감쇠를 보완하기 위한 증폭기가 필요하게 된다.

신호를 증폭시키기 위하여 사용된 종래의 방식은 광 신호를 전기 신호로 변환시켜 사용하는 재발진 증계기이었다. 그러나, 이는 광원인 반도체 레이저, 광 검출기와 함께 펄스 스라이싱, 재타이밍, 파형 정형을 위한 전자회로가 부가되므로 복잡하며 저 효율적인 결과를 초래하였다. 그러나 이와 같은 변환을 하지 않고 광을 직접 증폭시키는 광 증폭기가 개발되면서 광통신은 새로운 기술적 혁신기에 들어서게 되었다.

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

그러나 EDFA의 경우 원하는 정도의 증폭도를 얻어내기 위해서는 수십m 이상이라는 상당히 긴 광섬유를 사용해야 되기 때문에 단거리 광통신이

나 광 신호 처리 시스템에는 적용시키기 힘들다. 반면, 반도체 광 증폭기는 다른 소자와 쉽게 집적시킬 수 있고 스위칭, 루팅, 신호 템핑, 펄스 형상 재발진 등과 같은 다양한 기능 형성이 가능한 장점을 가지나,<sup>1)~4)</sup> 편광 의존성을 가지는 단점이 있다. 따라서, 이러한 편광 의존성 문제만 해결한다면 반도체 광 증폭기는 EDFA보다 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 기대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 편광 의존 문제의 해결 방법에 대해 연구하였다. 이를 해결하기 위한 방법으로서 strain을 도입한 방법을 사용하였는데 지금까지 국내외적으로 연구되어진 tensile strain에 의한 방법은 TM 모드 이득을 높임으로 편광 의존 문제는 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 $\mu$ m 파장을 가지는 GaInAs 양자 우물층을 사용하여 파장을 고정시키고 이 GaInAs 양자 우물층에 GaAs Delta층을 삽입하여 tensile strain 효과를 가지게 함으로써 반도체 광 증폭기의 편광 의존성 문제를 해결할 수 있었다.

이상과 같은 본 연구에서 제안한 편광 비의존 특성을 갖는 구조를 실제로 반도체 광 증폭기에

적용한다면 광통신 시스템에 사용될 수 있는 반도체 광 증폭기를 실현할 수 있을 것이다.

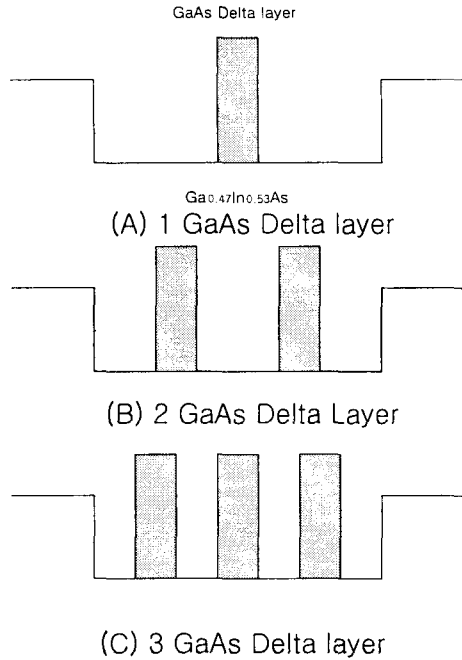
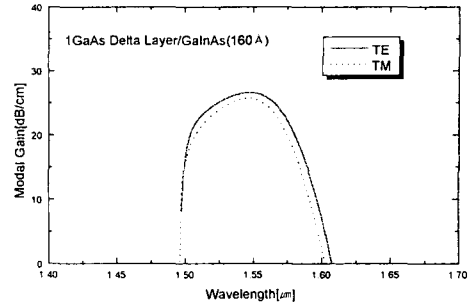


그림 1. GaInAs 양자우물층에 GaAs Delta Layer가 포함된 구조

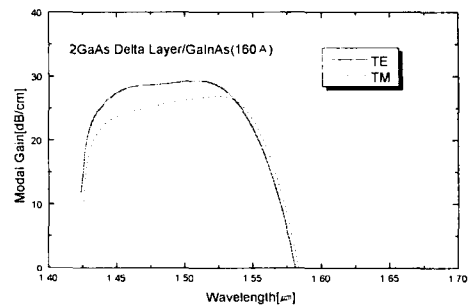
## II. 본 론

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 파장이 단파장으로 이동하기 때문에 원하는 파장을 맞추는 것은 불가능하였다. 따라서 GaInAs 양자우물 구조의 밴드갭 에너지를 고정시키면서 TM 편광 성분의 이득특성을 높이기 위하여 그림 1과 같은 GaAs Delta 층 구조가 포함된 양자우물 구조를 제안하고 그 이득특성을 계산하였다.

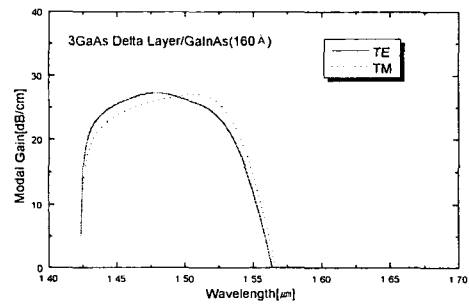
한편, 양자우물 구조에 있어서 TE, TM모드 이득계수를 결정하는 요소는 크게 2가지가 존재한다. 첫째로는 전도대와 heavy-hole대의 천이행렬과 전도대와 light-hole대의 천이행렬이 갖는 TE, TM 모드 전계에 의한 그 크기가 각각 다르기 때문이다.



A) GaAs Delta층이 한층 포함된 GaInAs QW구조의 이득특성 계산



B) GaAs Delta층이 두층 포함된 GaInAs QW구조의 이득특성 계산



C) GaAs Delta층이 세층 포함된 GaInAs QW구조의 이득특성 계산

그림 2. GaAs Delta층이 포함된 GaInAs QW구조의 이득특성 계산

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.

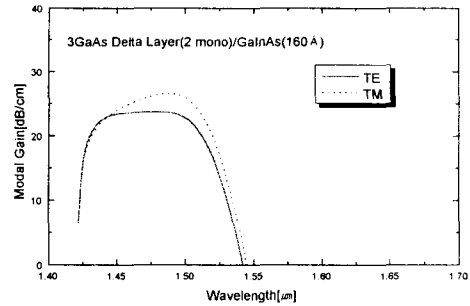
본 구조는 위의 두 원인 중에서 질량에 따라 heavy-hole과 light-hole이 서로 다른 밴드 구조를 갖는 성질을 이용한 구조이다. 먼저, TM 모드 이득을 크게 하기 위해서는 가전자대의 첫 번째 부밴드가 light-hole 밴드가 되어야만 한다.

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.

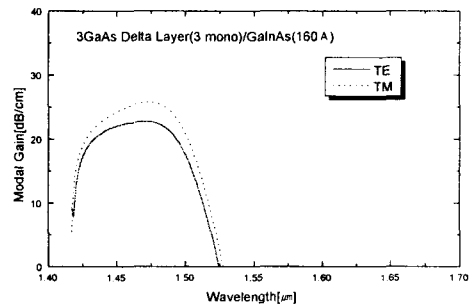
그림 1에 나타난 구조에서 Delta층은 GaAs로서 그 두께가 원자층(monolayers (ML))이다. InP에 격자정합된 GaInAs와 GaAs의 격자크기는 GaInAs가 약 3.8% 크므로, GaAs는 약 3.8%의 tensile strain이 걸리게 된다. 따라서 첫 번째 부밴드는 light-hole 밴드가 된다. 그림 1의 구조 중 A)의 경우는 GaInAs 양자 우물층의 중앙에 GaAs Delta층을 한층 포함한 것이고, B)의 경우는 GaInAs 양자 우물층의 3등분되는 지점에 포함시킨 것이며, C)의 경우는 4등분시켜 Delta 층이 3개가 들어간 것을 나타내고 있다. 여기서, C)와 같은 세 개의 GaAs Delta 층 구조 중에서 가운데 위치한 것은 heavy-hole, light-hole 밴드의 짝수 모드 포락선 함수를 위해, 양쪽의 두 개는 홀수 모드 포락선 함수를 위해 각각이 피크가 되는 지점에 위치하게 하였다.

그림 2에 그림 1의 세 구조에 대한 이득 특성을 나타내었다. 모든 계산에 있어서 가전자대 band offset은 160meV로 고정하였다. 세 구조 모두의 캐리어 밀도는  $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 으로 하였으며, GaInAs 양자 우물층은 파장을 1.5 $\mu\text{m}$ 대에 맞추기 위해 Tensile strain 효과를 고려하여 160(Å)으로 하였다. 그리고, Delta Layer는 1 원자층(약 5Å)으로 하였다.

따라서, strain량은 A)의 경우는 -0.1%의 tensile strain, B)의 경우는 -0.2% tensile strain, C)의 경우는 -0.3% tensile strain 량에 해당되며, 이는 통상



a) Delta layer의 두께가 2 원자층의 경우



b) Delta layer의 두께가 3 원자층의 경우

그림 3. GaAs Delta layer 두께에 따른 TE, TM 모드 이득의 변화

적으로 많이 사용하는 -1% 이상의 tensile strain을 줌으로서 TE, TM 모드 이득을 맞추는 구조의 경우 큰 strain 량으로 인해 중심파장이 1.35~1.4 $\mu\text{m}$  정도의 단파장대로 천이 하는 단점이 있는데 본 연구의 구조는 작은 strain 량을 가지므로 이러한 단점을 보상할 수 있다. 본 구조 역시 tensile strain 량이 증가할수록 중심파장이 단파장으로 천이하는 strain 효과를 볼 수 있는데 이는 아주 미미한 파장 천이이며, Delta Layer에 의한 TM 모드 이득의 증가 효과를 볼 수 있다.

그리고, 그림 2에서 A)의 1 GaAs Delta층이 포함된 GaInAs 양자 우물 구조가 1dB 이하의 TE, TM 이득차를 가지며, 3dB 이득 대역폭이 TE, TM 모드 동일하게 50nm 인 것을 알 수 있다.

B)의 2 GaAs Delta층이 포함된 GaInAs 양자 우물 구조의 경우는 대역폭은 A) 구조에 비해 넓어졌으나 TE, TM 이득차가 큰 것을 알 수 있으며,

C)의 3 GaAs Delta층이 포함된 GaInAs 양자 우물 구조의 경우는 TE, TM 이득차는 약 1dB 정도이며 3dB 대역폭도 85nm 로 A)의 경우 보다 훨씬 넓어진 것을 알 수 있다. 따라서 넓은 파장영역에서 편광에 의존하지 않는 이득계수를 갖는 양자우물 구조의 반도체 광 증폭기는 그림 2의 C) 구조인 3 GaAs Delta층이 포함된 GaInAs 양자 우물층 구조를 택하면 실현될 수 있음을 알 수 있다.

그리고, 그림 2의 C)와 같은 구조에서 GaAs Delta층의 두께에 따른 편광 비의존성을 계산하였다. 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 A)의 경우는 Delta 층이 2 원자층의 두께를 가지는 경우이고, 그림 B)는 3 원자층의 두께를 가지는 경우에 대해서 계산 결과를 나타낸 것이다.

그림 B)에 있어서 Delta층 두께의 증가로 인해 그림 2의 C) 경우 보다 중심 파장이 단파장으로 이동되었음을 알 수 있으며, TM 모드 이득 역시 strain 량의 증가로 TE 모드 이득보다도 크게 되는 것을 알 수 있다. 또한 그림 2의 C)의 경우는 그림 3의 B)의 경우보다도 tensile strain 효과가 더욱 더 현저하게 나타남을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구처럼 GaAs Delta층을 도입한 구조에 있어서 1 원자층의 두께를 가지는 Delta 층이 3층 포함된 GaInAs 양자 우물층(160Å) 구조가 3dB이득 대역폭이 TE, TM 모두 85nm로 세 가지 구조 중에서 가장 넓으며, 광대역 파장 분할 다중화(WDM) 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 적절한 량의 tensile strain을 인가하면 양자우물 전체에 인가하는 구조보다 더 효율적임을 알 수 있다.

### III. 결 론

편광 비의존 특성을 가지는 반도체 광 증폭기 개발을 위해 지금까지와는 다른 새로운 방법인 GaInAs 양자 우물에 GaAs Delta 층을 삽입한 구조를 사용하여 계산한 결과, GaAs Delta 층이 3층 포함된 구조에서 3dB 이득 대역폭이 TE, TM 모두 85nm로 매우 넓은 대역폭과 편광 비의존 특성

을 함께 가지는 구조를 얻어낼 수 있었다.

이러한 GaInAs 양자 우물에 GaAs Delta 층을 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.

### 감사의 글

본 연구를 수행함에 있어 한국과학기술연구원 광기술연구센터의 김선호박사님과 연세대 전자공학과 최우영 교수님의 도움이 있었기에 감사로 드립니다.

### 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] Peter S. Zory. Jr., "Quantum Well Lasers," pp. 52-57, 1993.



**박 윤 호(Yoon-Ho Park)**  
 1985-1989 한국해양대학교 전  
 자통신공학과(공학사)  
 1991-1993 한국해양대학교 전  
 자통신공학과(공학석사)  
 1994-1998 한국해양대학교 전  
 자통신공학과(공학박사)

1998-현재 한국과학기술연구원 박사후연수과정  
 \*관심분야 : 광집적소자, 광기능 소자



**조 응 상(Yong-Sang Cho)**  
 1993-1996 서울시립대학교 반  
 도체공학과(공학사)  
 1997-1998 연세대학교 전자공  
 학과(공학석사)  
 1999-현재 연세대학교 전기 및  
 컴퓨터공학과 박사과정

\*관심분야 : 광집적소자, 광기능 소자



**강 병 권(Byung-Kwon Kang)**  
 1986-1990 연세대학교 물리학  
 과(이학사)  
 1990-1992 연세대학교 물리학  
 과(이학석사)  
 1994-현재 연세대학교 물리학  
 과 박사과정

1992-1998 현대전자 과 장  
 \*관심분야 : 광집적소자, 광기능 소자

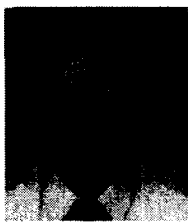


**김 정 호(Jeong-Ho Kim)**  
 1993-1998 한국해양대학교 전자  
 통신공학과 공학사  
 1998-현재 한국해양대학교 전자  
 통신공학과 석사과정  
 \*주관심분야: 반도체레이저,반도  
 체 광증폭기



**황 상 구(Sang-Ku Hwang)**  
 1985-1990 동아대학교 전자공학  
 과 공학사  
 1990-1992 한국해양대학교 전자  
 통신공학과 공학석사  
 1997-현재 한국해양대학교 전자  
 통신공학과 박사과정

\*주관심분야: 반도체레이저,반도체 광증폭기



**이 석(Seok Lee)**  
 1981-1985 연세대학교 물리학  
 과(이학사)  
 1985-1987 연세대학교 대학원  
 물리학과(이학석사)  
 1989-1994 연세대학교 대학원  
 물리학과(이학박사)

1994-1995 KIST 광전자연구실 박사후 연수  
 1995-1996 동경대학 전자공학과 방문연구원  
 1996-현재 KIST 광기술연구센터 선임연구원  
 \*관심분야 : 광집적소자, 광기능 소자



**홍창희(Tchang-Hee Hong)**  
 1969 한국해양대학교 (공학사-  
 항해학)  
 1974 부산대학교 (이학사-물리학)  
 1977 동경공업대 (공학석사-전  
 자공학)

1981 동경공업대 (공학박사-전자물리)  
 1972-1979 한국해양대학교 전임강사  
 1979-1983 한국해양대학교 조교수  
 1982-1983 서울대학교 객원교수  
 1983-1988 한국해양대학교 부교수  
 1988-현재 한국해양대학교 교수