

PL-9

편광 비의존형 반도체 광증폭기를 위한 delta-strained 양자우물의 특성 연구
Characteristics of delta-strained quantum-well for polarization insensitive semiconductor optical amplifiers

*조용상¹, 최우영¹, 이석², 김선호²
¹연세대학교 전자공학과, ²한국과학기술연구원 광기술연구센터

Abstract

Delta-strained quantum wells and the normal strained quantum wells are compared in regards to the amounts of band splitting, the transparent carrier densities, and the differential gains as function of the applied effective strain. It is shown that the strain efficiency of the delta-strained quantum wells is better than that of the normal strained quantum wells.

SOA의 편광 의존특성을 해결하기 위한 방법으로는 strain deformation potential에 의해서 양자우물의 가전자대 밴드구조를 변형시키는 방법이 있다. 그러나, 반도체 물질에 인가할 수 있는 strain의 양은 매우 한정된다. 이러한 문제는 1.55 μm에서 편광 비의존 특성을 갖는 SOA의 구현을 매우 어렵게 한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법의 하나로 제시된 delta-strained 양자우물(QW)의 유효 strain에 따른 가전자대 밴드구조의 변화, 투명 캐리어 농도(N₀), 차동이득 등의 특성에 대한 이론적 해석을 시도하였다. delta-strained QW은 격자정합된 InGaAs/InGaAsP QW 내에 매우 얇고 강한 strain이 인가된 GaAs층을 삽입하여 얻을 수 있다[1]. 이러한 구조에 대한 해석은 Tight-binding model[2]을 이용하여 한 개의 GaAs층이 삽입된 QW 구조에 대하여 이루어 졌으나 가전자대 밴드구조와 이득특성 외의 다른 특성에 대한 자세한 해석은 이루어지지 않았다. delta-strained QW이 갖는 이점은 1.55 μm의 장파장대에서 TM 모드 이득계수를 매우 크게 할 수 있다는 점이다. 그림 1에 나타난 양자우물 구조들의 유효 strain에 따른 가전자대 부밴드의 splitting 변화를 관찰하면 이에 대한 설명이 가능하다. 전산모의실험에 사용된, delta-strained GaAs층이 1개에서 3개까지 삽입된 구조와 well에 균일한 strain이 인가된 normal strained QW을 그림 1에 나타내었다.

양자우물의 밴드구조는 strain이 고려된 4×4 Luttinger-Kohn Hamiltonian을 FEM 방법으로 해석하였고, 광학적 이득계수는 Fermi's golden rule과 density matrix formalism을 이용하였다[3].

이들 구조에 대하여 양자우물에 인가된 평균 strain(ε_{eff})에 따른 부밴드 splitting(ΔE_{LH})의 변화를 그림 2에 나타내었다. ΔE_{LH}, ε_{eff}은 각각 식(1)과 (2)와 같이 정의 할 수 있다. (1)에서 ε은 인가된

strain이고 L_{strained}와 L_{unstrained}는 각각 delta-strained QW에서 strain이 인가된 층과 인가되지 않은 층의 두께를 나타낸다

$$\Delta E_{LH} = E_{L, \max} - E_{H, \max} \quad (1)$$

$$e_{eff} = \frac{L_{strained} \times \epsilon}{L_{strained} + L_{unstrained}} \quad (2)$$

그림 2의 결과로부터 같은 ε_{eff}에서, delta-strained QW의 ΔE_{LH}가 normal QW의 ΔE_{LH} 보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 단위 strain 당 적용되는 deformation potential의 효과가 delta-strained QW이 더 크다는 것을 의미한다. ΔE_{LH}가 음에서 양의 값으로 변하는 것은 strain을 인가함에 따라서 가전자대의 첫 번째 부밴드가 heavy hole에서 light hole 밴드로 바뀌기 때문이다. ε_{eff}의 변화에 따른 N₀를 그림 3에 나타내었다. 투명 캐리어 농도는 ΔE_{LH}에 의해 직접적인 영향을 받게 된다. 이는 heavy hole과 light hole 밴드간의 간격이 좁아지면 밴드 mixing 효과에 의해서 유효질량이 크게 증가하게 되고 가전자대의 density of state가 증가하기 때문이다.

그림 3의 결과에서, ε_{eff}가 증가함에 따라 delta-strained QW의 N₀는 TE, TM 모드의 경우에서 다 감소하는데 반하여 normal QW의 N₀는 거의 변하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그림 2의 결과와도 일치하는데, 이는 delta-strained QW이 strain에 대한 효율이 좋다는 사실을 뒷받침 해준다.

그림 4는 ε_{eff}의 변화에 따른 차동이득계수의 변화를 나타낸 것이다. ε_{eff}가 커짐에 따라서 delta-strained QW와 normal QW 모두 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 인가된 strain이 증가함에 따라 light hole 밴드의 에너지 준위가 heavy hole보다 점점 높아지므로 TE 모드의 경우 점점 감소함을 보이고, TM 모드의 경우는 점점 증가하는 경향을 보인다.

다. 결론적으로, delta-strained QW의 특성은 ϵ_{eff} 이 증가함에 따라 더 좋은 특성을 보이고 있다. delta-strained GaAs층의 개수가 1개에서 3개로 증가함에 따라 가전자대의 band splitting은 더욱 커졌으며 이로 인해 N_0 는 점차 감소하였고 차동이득계수는 증가하였다. 또한, delta-strained GaAs층의 위치에 따라라도 매우 다른 특성을 보이는데, 이는 delta층의 기능이 단순히 물질에 strain 효과를 가져오는데 그치지 않고 입자의 파동함수 자체에 영향을 줌으로써 strain의 효율을 극대화시킨다는 것으로 해석할 수 있다. delta-strained QW의 이러한 특성은 양자우물의 전류-이득특성, 3-dB gain bandwidth등을 delta-strained GaAs층의 위치에 따라 변화시킬 수 있는 중요한 설계변수로도 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] M. Hovinen, et al., *Electro-optics Soc. Anual Meeting MA. Boston*, Nov, pp. 13-14, 1996.
- [2] A. D. Carlo, et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-34, pp. 1730-1739, 1998.
- [3] D. Ahn and S. Chuang, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 2400-2405, 1988.

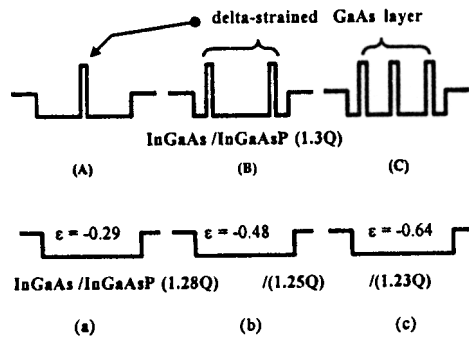


그림 1. 전산모의 실험에 사용된 양자우물 구조. (A), (B),(C):InGaAs/InGaAsP(1.3Q) 양자우물 구조에 delta-strained GaAs층이 각각 1개, 2개, 3개가 포함된 구조. (a),(b),(c):In_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}AsP_{1-y} 양자우물에 $\epsilon_{eff} = -0.29, -0.48, -0.64$ 의 균일한 strain을 인가한 구조.

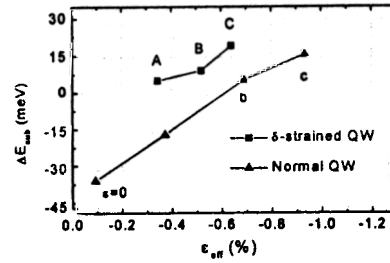


그림 2. ϵ_{eff} 에 따른 ΔELH 의 변화. A:1개의 delta-strained, B: 2개의 delta-strained, C: 3개의 delta-strained QW; a: normal QW($\epsilon_{eff} = -0.29$), b: normal QW($\epsilon_{eff} = -0.48$), c: normal QW($\epsilon_{eff} = -0.64$)

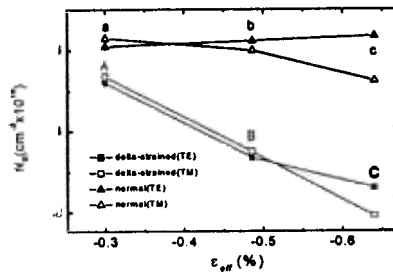


그림 3. ϵ_{eff} 에 따른 N_0 의 변화. ■:delta-strained QW(TE mode), □: delta-strained QW(TM mode), ▲: normal QW(TE mode), △: normal QW(TM mode)

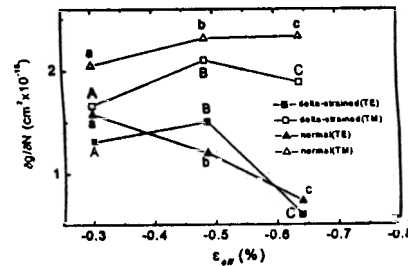


그림 4. ϵ_{eff} 에 따른 차동이득계수의 변화. ■:delta-strained QW(TE mode), □: delta-strained QW(TM mode), ▲:normal QW(TE mode), △: normal QW(TM mode)