

양자선 격자 구조를 갖는 양자점 소자의 미니밴드구조에 대한 해석

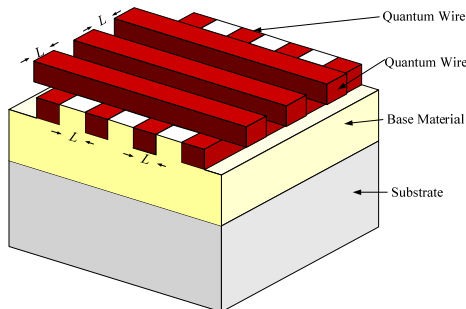
Analysis for miniband structure of Quantum dots based on quantum wire arrays

정의찬, 이종창

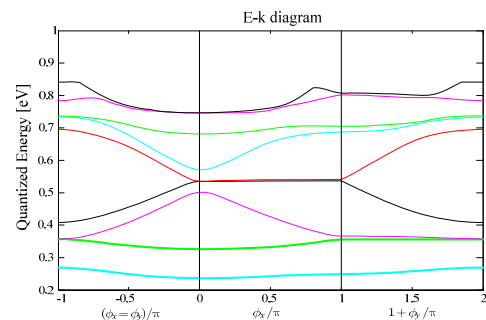
홍익대학교 전자정보통신공학과

e-mail : wave@hongik.ac.kr

광소자의 개발은 1 차원 구조인 양자우물 구조에서 2 차원 구조인 양자선 구조, 3 차원 구조인 양자점 구조로 발전하고 있다. 이것은 3 차원 구조인 양자점 구조가 소비 전력이 적고 빛의 생산량이 많으며 동작 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있기 때문이다. 본 연구의 주제인 격자 구조로 된 양자선 구조는 첫 번째 양자화된 에너지를 갖는 전자의 분포가 양자점 형태를 띄고 있고 두 번째 양자화된 에너지를 갖는 전자의 분포가 양자선 형태를 띄고 있다. 그래서 전자의 움직임을 세 방향 모두 제한해 전자의 에너지 밀도가 높아 광이득율이 높다는 양자점의 장점과 전자를 전송하기 쉽다는 양자선의 장점을 모두 가지고 있다. 그러나 격자 구조로 된 양자선 구조가 양자점 특성을 가지기 위해서는 첫 번째 양자화된 에너지 값 중 가장 큰 값과 두 번째 양자화된 에너지 값 중 가장 작은 값의 차이인 miniband-gap이 $2kT$ 보다 커야 한다. Miniband-gap이 $2kT$ 보다 작으면 전자의 열에너지 때문에 전자가 첫 번째 양자화된 에너지에 머물러 있지 않고 두 번째 양자화된 에너지 상태로 전이해 양자점의 특성이 나타나지 않게 된다. 격자 구조로 양자선의 형태는 그림 1 과 같다. 그림 1 을 보면 양자선이 x, y 방향으로 계속 반복됨을 알 수 있다. 실제로 이러한 구조를 만들 때에는 양자선이 50 ~ 100 개 정도가 반복 배치 된다. 이러한 주기적인 구조를 해석하기 위해 전자의 파동 함수는 특정한 위치의 파동함수와 한 주기 떨어진 두 파동함수는 절대값은 같고 위상만 차이가 난다는 Floquet 정리를 적용했고 전자의 양자화된 에너지 분포와 파동함수를 구하기 위해 3 차원 FEM을 이용하였다. 그림 2 는 불순물을 첨가하지 않은 AlN 내부에 3nm 길이의 정육면체 단면을 지닌 격자 구조의 양자선이 3nm 간격으로 배치되어 있을 때의 양자화된 에너지이다. 그림 3 은 $1.55\mu\text{m}$ 파장의 레이저 다이오드를 제작할 때 사용하는 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 를 이용해 격자구조 양자선을 제작 했을 경우 양자선의 너비와 간격의 변화에 따른 miniband-gap의 변화이다. 그림 4 는 청색 레이저 다이오드를 제작할 때 사용하는 GaN/AlN를 이용해 격자구조 양자선을 제작 했을 경우 양자선의 너비와 간격의 변화에 따른 miniband-gap의 변화이다.

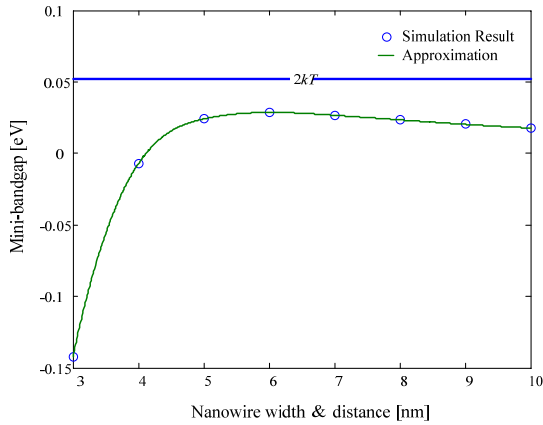


[그림 1] Quantum Wire Structure

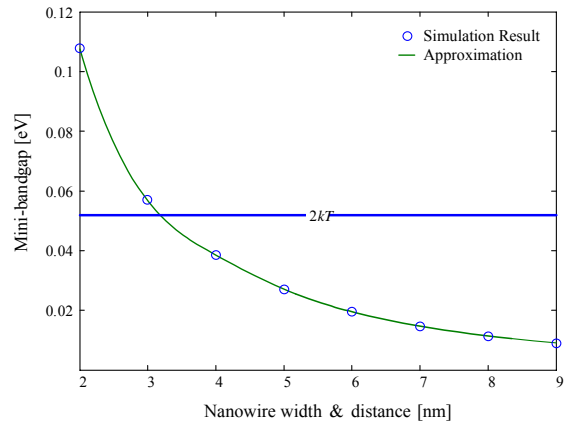


[그림 2] Energy Band Structure

두 그림을 보면 GaN/AlN의 경우 miniband-gap을 $2kT$ 보다 크게 제작 하는 것이 가능하지만 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 의 경우는 불가능하다. 이것은 GaN/AlN의 경우 두 물질의 bandgap 차이가 충분히 크지만 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 의 경우 두 물질의 bandgap의 차이가 작기 때문이다. 그러므로 격자 구조의 양자선을 이용해 양자점 특성을 지닌 $1.55\mu\text{m}$ 파장의 빛을 발산하는 광소자를 제작하려면 기존의 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 기반이 아닌 더 큰 bandgap을 가지는 물질로 대체해야 한다. 그리고 GaN/AlN를 이용한 청색 파장의 격자 구조의 양자선은 양자선의 너비와 간격을 3nm 이하로 하면 miniband-gap이 $2kT$ 보다 커서 양자점의 특성을 지니게 된다.



[그림 3] $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 의 mini-bandgap



[그림 3] GaN/AlN의 mini-bandgap

REFERENCE

1. J. C. Yi, N. Dagli and L. A. Coldren, "Investigation of tilted superlattices for quantum wire laser applications," Applied Physics Letters, vol. 59, pp. 3015-3017, 1991
2. Matthew N.O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics," CRC Press, 2001
3. C. Yi and N. Dagli, "Finite-element analysis of valence band structure and optical properties of quantum-wire arrays on vicinal substrates," IEEE J. Quantum Electronics, vol. 31, pp.208-218, 1995
4. Joachim Piprek, "Semiconductor Optoelectronic Devices," ACADEMIC Press, 2003