다중양자우물층의 성장을 위한 수직형 액상결정성장장치의 개선에 관한 연구

안 세 경[1], 洪 彰 禧[2]

A Study on the Improvement of Vertical Liquid Phase Epitaxy for the Growth of Multi Quantum Well Layers

Se-Kyung An, Tchang-Hee Hong

Abstract

Recently, quantum well devices using quantum size effect are being actively researched in the world. It is natural trend because these devices have advantages such as high speed lasing characteristics, high quantum efficiency, and reducing the threshold current of the laser diodes. It is necessary to grow below a hundred Å of quantum well layer in order to make these QW devices.

To grow a MQW epitaxital layers the characteristics of high efficiency and uniformity it was necessary to improve our previous vertical LPE system, mainly for the thermal stability of a furnace and the vacuum quality. We made also a simple bulk laser diode and measured its characteristics to test the performance of our modified system. The results are as follows : the internal quantum efficiency of 77%, internal loss of 28㎝$^{-1}$ and the specific temperature of 58K. Form the result, therefore, the LPE is compared with those of the commercial LPE system as shown above. We also tried to grow the uniform MQW layers with repeatability using this improved LPE system.

1) 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정 반도체재료 전공
2) 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

First of all we made a new graphite boat rotating substrates to get the stability of growth solution. As a result to these modification we get the uniform MQW layers with repeatability, which consists of the 1.3㎛ InGaAsP of 100Å thickness and the InP layers of 240Å.

제 1 장 서 론

QW(Quantum Well)소자는 반도체소자의 고속화, 양자효율개선, 반도체레이저의 임계전류의 극소화 등으로 응용 범위가 무한하다. 그러나 이러한 QW소자는 수 Å에서 수백 Å 정도의 초박막 성장이 필수적으로 본 연구에서는 본 연구실에서 자체 제작한 수직형 LPE(Liquid Phase Epitaxy)장치를 개선하여 양질의 MQW(Multi Quantum Well)을 성장해 보고자 한다.

먼저 이러한 LPE장치로 고품질의 MQW을 성장시키기 위하여 성장장치의 온도안정성과 고진공이 유지되도록 하는 등 기존의 장치를 개선하고 이렇게 수정된 LPE장치의 성능개선의 확인을 위하여 전면 전극형 bulk-LD제작하여 상용화되어진 bulk-LD에 필적할 만한 성능을 얻었다. 또한 성장층의 균일성 및 재현성을 가지며 100Å 이하의 MQW를 성장시키기 위하여 흑연보트를 기판이 회전하는 구조로 변경하고 InP seed 종류에 따른 성장두께 제어 등 여러 가지 실험적 방법을 제안하여 양질의 MQW층을 성장시켰다.

제 2 장 수직형 LPE장치의 개선

본 연구실에서는 LPE장치의 장점을 살려 대학단위에서도 갖출 수 있을 정도의 제작비가 저렴하며 간편한 수직형 LPE장치를 제작하여 수년간 이 장치의 유용성을 검토해 오고 있었다. 2상용액법을 이용한 수직형 LPE장치로 Ⅲ-Ⅴ족 화합물반도체를 성장할 때 양질의 에피층을 얻기 위하여 성장장치의 온도특성과 진공도가 매우 중요하다. 이러한 수직형 LPE 장치가 갖추어야 할 요건은 온도안정성과 고진공유지로서 다음과 같다.

[1] 반응관 내부의 기판부의 온도흔들림 : 성장용액의 안정성 확보

[2] 반응관의 원주방향으로의 온도편차 : 흑연보트를 이용한 결정성장시 성장용액간의 온도차 유발

[3] 반응관의 외부와 중심의 온도편차 : 성장두께의 균일성 확보

[4] 반응관과 가스라인의 수소치환 전의 진공유지 : 반응관과 가스라인의 청결도 확보

초기에 제작된 수직형 LPE장치의 전기로의 온도특성은 650℃ 근처에서 온도흔들림이

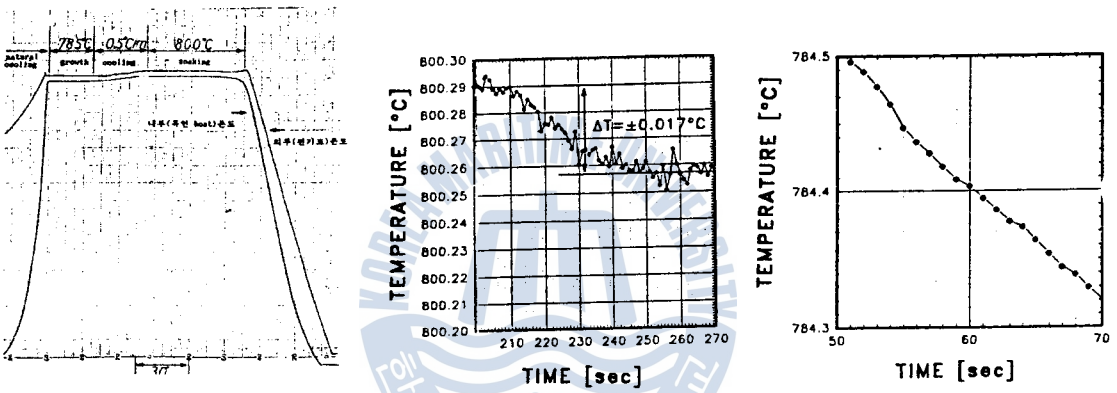
dCollection

±0.05℃ 이내이며 원주방향으로의 온도편차가 ±0.5℃로서 너무 크고 반응관 외부와 중심 사이 온도편차가 약 3℃ 로서 성장용액간의 온도차를 유발시키는 문제를 안고 있었다. 실제로 흑연보트의 원주방향 온도균일성이 ±0.05℃ 이내로 유지되어야 다중박막 결정성장이 가능한 것으로 알려져 있는데 그 값을 만족시키지 못하였기 때문에 재현성 있는 다중박막 결정성장이 불가능하였다. 이것은 KANTAL선을 8.4㎜φ의 열선을 15㎜ 간격으로 120㎜φ의 코일형태로 감아 석고로 성형을 하는 과정에서 미소하나마 열선의 간격에 오차가 발생하였고, 열선에서 부터 일정한 두께로 정밀하게 작은 오차도 없이 석고를 입혀야 하는데 여기에서도 부분적으로 두께 차이가 있었던 것으로 짐작되며, 내벽의 마무리 작업이 곱게 되지 않고 약간의 불균일이 있었던 것 등으로 짐작되었다. 또한 열선이 흑연보트와 평행한 방향에서 열공급이 되는 것이 아니라 약간 기울어져 비스듬히 열을 공급하는 구조인 것도 상당한 영향을 미치는 것으로 생각되었다. 따라서 개선된 LPE장치의 전기로는 이러한 점을 보완하여 2㎜φ정도의 KANTAL선을 코일형태로 감아서 전기로의 외벽과 아래부분에 1㎝간격으로 배열시켰으며, 온도균일도를 높여주기 위하여 zirconium관을 중간에 삽입하였다. 이렇게 수정된 전기로의 온도특성이 그림 2.1에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 매우 안정된 동작특성을 보이며 그림 2.1(a)의 soaking부를 확대한 그림 (b)에서 알 수 있듯이 800℃근처에서 온도흔들림이 ±0.02℃ 이내로 매우 안정된 값을 보였으며 그림 (c)의 정상적인 냉각단계에서도 매우 안정됨을 보였다. 그리고 수정된 전기로의 원주방향으로의 온도편차와 반응관 중심과의 온도편차를 그림 2.2에 나타내었다. 그림 2.2는 흑연보트의 각 용액 홀 간의 온도균일도를 정확히 측정하기 위하여 원주방향의 온도분포를 확대하여 나타낸 것으로 흑연보트의 원주방향의 온도편차가 ±0.075℃ 이내로 LPE의 일반적인 온도기준(±0.05℃ 이내)보다 ±0.025℃ 정도 큰 값이나 실제로 측정점의 위치가 용액 홀에서 약 20㎜ 정도 바깥이라는 것을 감안하면 실제 흑연보트의 각 용액 홀의 온도차는 이 보다 줄어들어 ±0.05℃의 온도기준을 만족할 것으로 짐작된다. 또한 반응관 중심의 soaking 온도가 650℃이고 반응관 외부의 온도가 원주방향으로 약 650.75℃~650.9℃로 나타남으로서 반응관 외부와 중심의 온도편차가 1℃ 이하로 나타났다. 이러한 결과는 수정 전의 전기로에 비하면 상당히 개선된 것이라 할 수 있다.

그리고 수정 전의 반응관은 석영재질인 수소인입라인과 열전대 보호라인이 스텐레스재질인 플렌지에 연결되어 석영재질의 손상 등으로 인한 고진공유지에 어려움이 많았다. 이러한 점의 보완을 위하여 그림 2.3의 개선된 수직형 LPE장치의 개략도에서와 같이 반응관에 직접 수소인입라인과 열전대 보호라인을 연결시켜 수정 전 LPE장치에서 자주 발생한

dCollection

leakage를 해결하였으며 플렌지에 연결되어있는 진공펌프라인도 5㎜φ의 라인을 30㎜φ로 바꾸어 진공의 효율을 최대로 높였고 흑연보트를 놓기 위한 tray와 stepping motor로 흑연보트를 제어하기 위한 중앙축과 플렌지와의 연결부위에 bushing과 O-ring을 반복 삽입하여 수정 전의 장치와 달리 다른 도구의 사용 없이 10^{-3}torr까지 고진공을 잡을 수 있게 하였다. 또한 O-ring의 열화를 방지하기 위한 냉각수를 수정 전 LPE장치에서는 구리재질의 cooling tube로 되어있던 것을 플렌지 자체에 냉각수 연결부위를 두어 많은 양의 냉각수를 플렌지에 직접 연결시켜 냉각효율을 높였고 수정 전의 구리재질로 인한 산화도 방지하였다.



(a) (b) Soaking의 경우 (c) 냉각의 경우

그림 2.1 수정 후 전기로의 온도특성

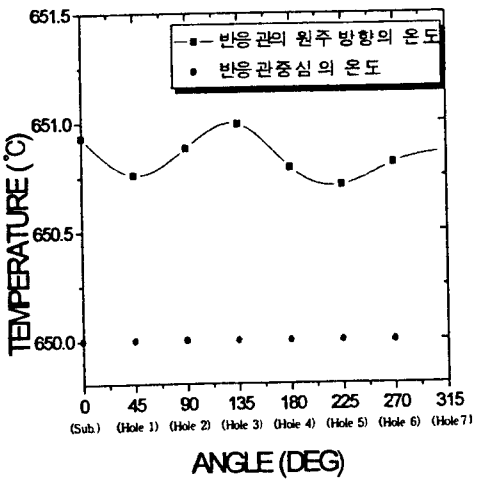


그림 2.2 수정 후 전기로의 원주 방향으로의 온도특성

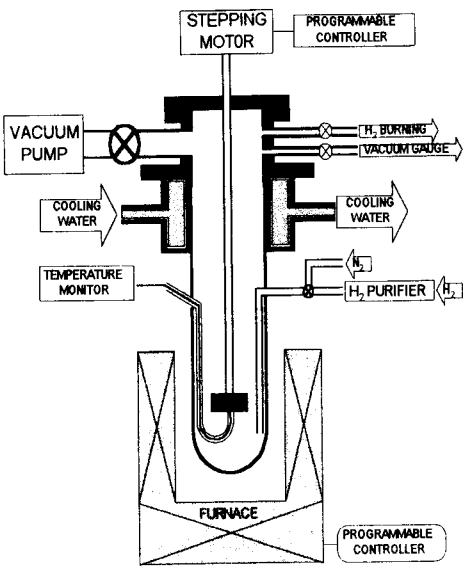


그림 2.3 수정 후 LPE 장치의 개략도

dCollection

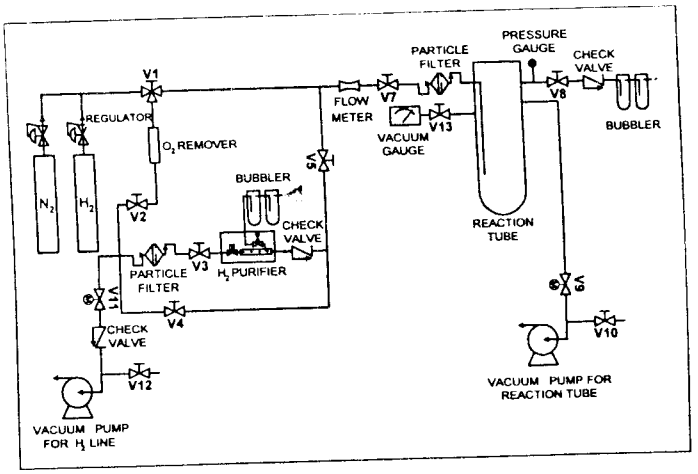


그림 2.4 수정된 LPE장치의 가스라인

LPE장치에서 기본적으로 필요한 가스라인은 성장시 분위기 가스로 쓰이는 수소라인과 purge 및 장치를 사용하지 않을 때 사용되는 질소라인, 반응관의 진공을 유지하기 위한 진공라인으로 나눌 수 있다. 수정 전의 가스라인에서는 진공펌프와 bubbler를 통한 외부와의 연결부위에 항상 역류의 위험성을 가지고 있어 그림 2.4의 수정된 가스라인에서 처럼 check valve를 달아 주어 진공펌프의 오일과 bubbler의 실리콘오일의 역류를 막아 실험장치의 안정성에 만전을 기하였다. 그리고 가스라인 자체도 고진공용을 사용하여 진공의 유지에도 힘을 기울였다.

제 3 장 InGaAsP/InP bulk형 LD의 제작

앞에서 논의된 수정된 LPE장치의 성능을 확인하기 위하여 본 장에서는 수정된 LPE장치를 이용하여 가장 간단한 InGaAsP/InP bulk- LD를 제작하여 특성을 조사해 보고자 한다.

3.1 InGaAsP/InP bulk형 LD의 제작

준비된 In과 GaAs, InAs와 InP를 흑연보트에 삽입하고 성장용액의 불순물 제거 및 성장용액의 열평형을 위하여 650℃에서 3시간 이상 source baking된 성장용액에 기판과 cover를 넣고 성장을 시작하기 전에 열손상을 줄이기 위해 650℃에서 40분간 soaking하였으며, 결정성장 직전 In용액으로 InP기판을 15초간 melback[1]하였으며 1.3㎛ InGaAsP/InP 의 활성층은 630℃에서 10초간 성장을 하였다. 웨이퍼의 p측 전극으로 Ti(300Å)/Pt(200Å)/Au(4000Å)을 증착시켰으며 Fabry-Perot 공진기의 거울면의 형성을 용이하게 하기 위하여 웨이퍼의 뒷면을 100㎛ 두께가 되도록 lapping하였고 n측 전극은 Cr(500Å)/Au(5000Å)을

dCollection

E-beam 증착기로 증착시켰으며, 400℃에서 30초간 열처리하여 모든 공정을 완료하였다.

3.2 InGaAsP/InP bulk-LD의 전기·광학적 특성

제작된 반도체레이저의 전기저항의 크기를 알아보기 위한 전류 대 전압(I-V)특성을 조사한 결과, 순방향 도통전압이 0.75V, 역방향 항복전압이 -5V 전후로서 1.3㎛ InGaAsP/InP LD가 가지는 일반적인 상용화된 소자의 특성과 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 I-L특성을 알아보기 위한 공진기 길이에 따른 I-L특성변화를 나타낸 그림 3.1에서 발진개시 전류밀도 J_{th}는 약 1~2KA/cm^{2}로서 전형적인 LD의 J_{th}≃2~3KA/cm^{2}보다[2] 적은 값으로 아주 낮은 발진개시 전류밀도로서 특성이 뛰어남을 알 수 있으며 이 그림에서 광출력이 20㎽에 이를 때까지 다중 측모드 동작에 의한 kink현상[3),4)]이 일어나지않고 제작된 bulk-LD가 단일 측모드로 동작함을 알 수 있다. 그림 3.2는 제작된 bulk-LD의 활성층의 내부양자효율과 내부손실을 구하기 위한 공진기 길이에 따른 미분양자효율의 역수를 나타낸 그림으로서 내부양자효율 η_i가 77%로서 캐리어의 주입 효율이 양호하며, 활성층의 에피 특성이 우수하여 비발광 재결합과 같은 현상이 거의 일어나지 않는 것으로 추정할 수 있다. 그리고 내부손실 α_{int}=28㎝$^{-1}$로서 상용의 LD의 내부손실의 30㎝$^{-1}$에 비하여 아주 우수하다는 사실을 알 수 있다. 또한 제작된 bulk 상태의 InGaAsP/InP LD의 특성온도 T_o는 58K로서 알려져 있는 값 50~75K와 거의 비슷한 값을 가지고, 현재까지 LPE로 제작된 QW-LD의 경우[5)~7)]와 비교해 보면 거의 평균치에 가까움을 알 수 있다.

이러한 측정결과들로부터 개선된 LPE장치로 성장된 bulk-LD가 상용화 되어 있는 LD의 값과 비교하여 거의 비슷한 값을 가짐으로 아주 우수한 결정성장이 되었음을 확인하였다.

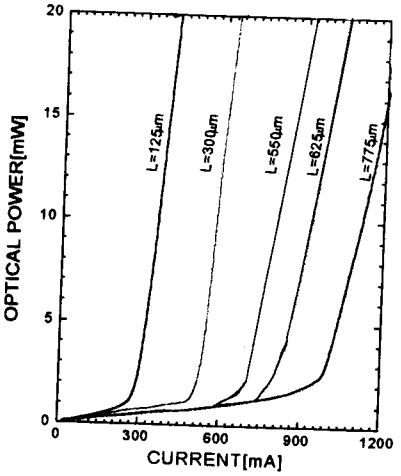


그림 3.1 길이 L에 따른 I-L특성

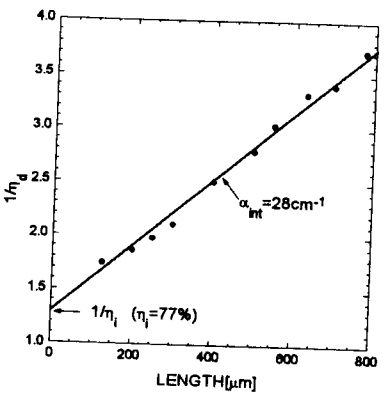
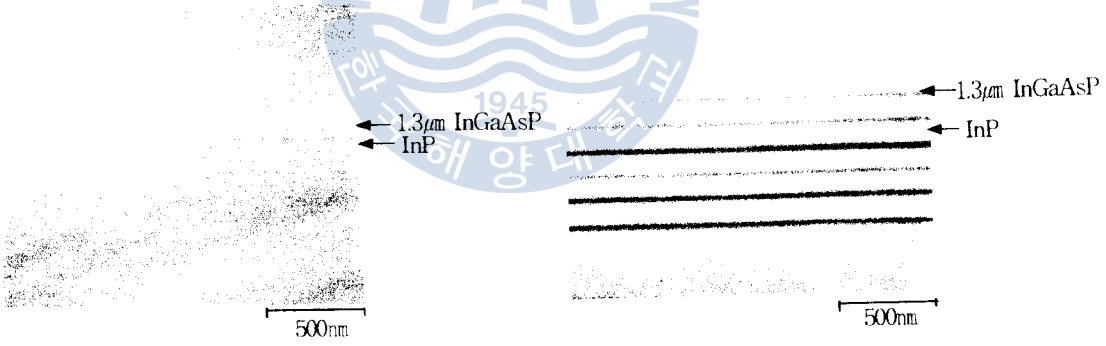


그림 3.2 η_i, α_{int}의 측정

dCollection

제 4 장 InGaAsP/InP MQW결정성장

먼저 본 장에서는 수정 전의 LPE장치와 수정 후의 LPE장치로 성장된 MQW의 단면 SEM사진으로 개선된 수직형 LPE장치의 성능을 알아보고자 한다. 이렇게 성장된 MQW의 단면 SEM사진이 그림 4.1과 4.2로서 그림에서 어둡게 보이는 부분은 1.3㎛ InGaAsP이며 밝게 보이는 부분은 InP층이다. 그림 4.1의 개선 전의 LPE장치로 성장된 MQW는 냉각속도 0.4℃/min, 성장온도 630℃로서 그림 (a)는 1초간 5회 반복성장시킨 것으로 1.3㎛ InGaAsP층의 두께가 약 80~120Å정도로 현재까지 보고[8]되어있는 LPE를 이용하여 성장가능한 최소의 두께를 보이나 성장계면이 좋지않고 그림 (b)는 (a)와 같은 조건으로 1초간 3회, 2초간 3회 반복 성장시킨 것으로 성장계면의 균일성은 좋으나 1.3㎛ InGaAsP층이 200~300Å으로 두께의 균일도가 매우 떨어지며 InP의 두께도 850Å 정도로 매우 두껍다. 그러나 그림 4.2의 개선 된 LPE장치로 1초간 3회 반복성장시킨 MQW는 210Å의 1.3㎛ InGaAsP와 360Å의 InP 두께로 매우 얇고 양질의 균일도를 보인다. 이러한 결과로부터 액상결정성장시 성장장치의 온도균일성과 진공유지가 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.



(a) 계면특성이 나쁜 경우 (b) Well층의 두께가 균일하지 않는 경우

그림 4.1 수정 전 LPE장치로 성장된 QW의 단면 SEM사진

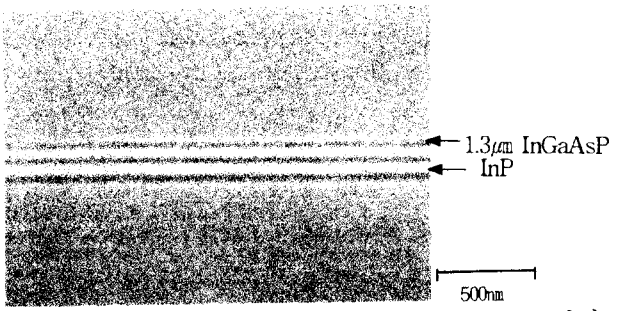


그림 4.2 수정 후 LPE장치로 성장된 QW의 SEM단면

dCollection

4.1 흑연보트의 구조에 따른 MQW결정성장

LPE방법으로의 결정성장에 있어 흑연보트는 그 구조나 형태에 따라 성장의 좋고 나쁨을 결정하는 가장 중요한 요인으로서 재료의 순도와 가공의 정확도 및 평탄도가 좋아야 하며 지속적인 청결도가 유지되어야 한다. 그림 4.3의 수정 전의 흑연보트는 아래쪽 흑연보트에 기판을 놓고 위쪽 흑연보트에 6개의 성장용액을 놓아서 성장용액의 회전으로 결정을 성장시켰다. 그러나 이렇게 제작된 흑연보트는 수직형 LPE에서 주로 사용되는 흑연보트의 구조로서 bulk와 같은 성장시간이 긴 결정성장에는 큰 문제가 되지 않으나 성장시간이 짧은 QW층의 성장에는 성장용액의 회전으로인한 rolling으로 얇고 재현성 있는 결과를 얻기가 힘들었다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 제작한 흑연보트가 그림 4.4로서 그림의 왼쪽의 흑연보트를 맨 아래에 두어 성장용액이 담기는 흑연보트를 고정시키고 그 가운데에 기판이 회전하는 흑연보트를 두어 성장시 성장용액의 안정성을 최대한 확보하였다. 이러한 구조의 성장특성을 알아보기 위하여 수정 전, 후 각각의 흑연보트를 사용하여 성장온도 630℃, 냉각속도 0.4℃/min로서 1.3㎛ InGaAsP층과 InP층을 1초간 3회 반복킨 결정성장을 그림 4.5과 그림 4.6에 각각 나타내었다. 그림 4.5는 성장용액이 회전하는 구조로 성장된 MQW층으로 1.3㎛ InGaAsP층의 두께가 약 200Å이며 InP층의 두께가 약 600Å으로 나타났으며 그림 4.6은 기판이 회전하는 흑연보트로 성장시킨 MQW로서 1.3㎛ InGaAsP층의 두께가 약 110Å이며 InP층의 두께가 약 350Å으로 그림 4.5와 비교하여 1.3㎛ InGaAs층이 약 90Å, InP층이 약 250Å정도로 매우 얇아졌음을 알 수 있다. 이는 결정성장시 성장용액의 안정성이 확보되어 일어난 결과로 볼 수 있으며 이러한 기판이 회전하는 구조의 흑연보트를 사용하면 100Å이하의 QW를 재현성 있게 성장시킬 수 있다는 가능성을 보여주는 매우 획기적인 실험결과라 할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 성장용액의 회전과 기판의 회전에 따른 QW층의 두께변화 및 성장온도에 따른 QW층의 두께변화를 그림 4.7 나타내었다. 본 실험의 조건은 InP single crystal을 사용하고 냉각속도는 0.4℃/min이며 성장시간을 1초로 3회 반복하였다. 그림 4.7(a)는 1.3㎛ InGaAsP의 경우 성장온도 630℃에서 성장용액이 회전하는 흑연보트의 경우에 QW층이 180Å에서 450Å 정도의 값을 나타내는 것과 비교하여 기판회전의 흑연보트에서 성장시킨 QW층이 100Å에서 200Å정도의 값으로 아주 얇고 재현성 있는 결과를 보인다. 또한 성장용액을 회전과 성장온도에 따른 QW의 두께 또한 성장온도가 높아질수록 더욱 얇은 값을 나타냄을 보인다. 이는 초기과포화도는 성장온도가 높아짐에 따라 더욱 작아지기 때문으로 생각된다. 그림 (b)는 InP를 그림 (a)와 같은 조건으로 성장시킨 것으로 성장온도 630℃에서 성장용액의 회전의 결정성장에서 InP층

dCollection

의 두께가 300Å에서 850Å의 값으로 나타났으며, 기판회전의 결정성장에는 300Å에서 550Å의 값으로 나타나 1.3㎛ InGaAsP의 경우와 같이 성용액이 회전하는 구조보다 재현성 있는 값을 나타냄을 알 수 있으며, 1℃ 높은 631℃에서 약 240Å정도의 가장 얇은 값을 보인다. 그러나 이러한 InP층의 두께는 MQW-LD의 barrier로 사용하기에는 다소 두꺼운 값을 보인다. 이러한 InP층의 두께가 InGaAsP층 보다 두꺼운 이유는 InP의 경우 InP seed와 냉각속도에 의해서 과포화도가 결정되므로 InP의 재료의 성질상 더욱 얇은 값을 갖기가 어렵다. 또한 현재 본 연구실에서 개선된 LPE장치로도 더 이상의 얇은 QW층을 갖기가 어려우므로 barrier층으로 1.1㎛ InGaAsP를 사용하기로 하고 그 타당성을 조사하기 위해 수회의 실험을 통해 그림 (c)와 같은 데이터를 확보하였다. 그림 (c)에서 1.1㎛ InGaAsP의 경우 수정된 흑연보트 사용에 따른 값이 InP 층보다 매우 얇아졌음을 나타내며 성장된 두께의 최소값이 약 80Å으로서 1.3㎛ InGaAsP의 경우보다 더 얇은 값을 얻었다. 이러한 기판이 회전하는 구조의 흑연보트를 이용한 최적의 1.3㎛ InGaAsP층과 1.1㎛ InGaAsP층의 SEM단면 사진을 그림 4.8에 나타내었다. 그림 (a)의 어두운 부분인 1.3㎛ InGaAsP층이 약 100Å, 밝게 보이는 InP층이 약 250Å의 두께로서 매우 얇은 층과 양질의 균일도를 얻었으며 그림 (b)의 어두운 부분인 1.1㎛ InGaAsP층이 약 80Å으로 아주 얇은 QW을 성장시켰다.

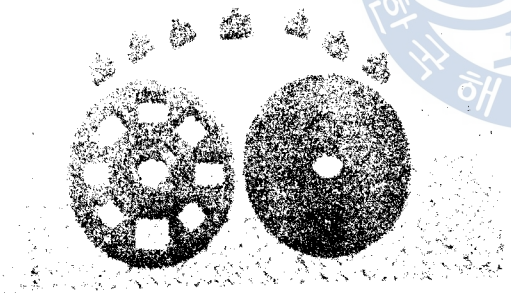


그림 4.3 수정 전의 흑연보트
(성장용액의 회전)

그림 4.4 수정 후의 흑연보트
(기판의 회전)

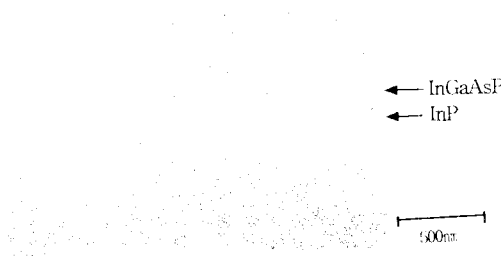


그림 4.5 수정 전의 흑연보트로 성장시킨
MQW의 단면 SEM사진

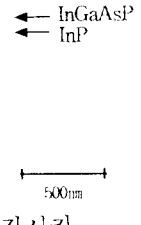
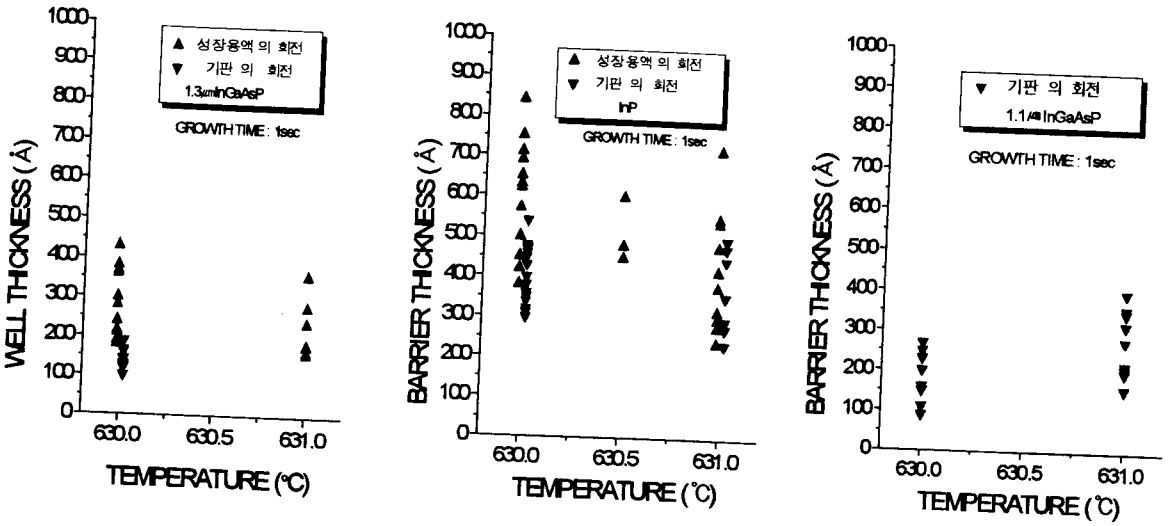


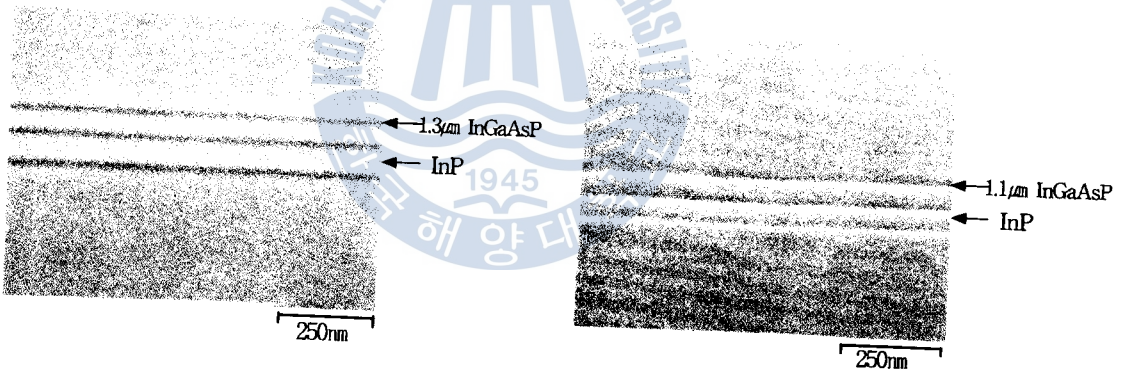
그림 4.6 수정 후의 흑연보트로 성장시킨
MQW의 단면 SEM사진

Collection



(a) 1.3㎛ InGaAsP (b) InP (c) 1.1㎛ InGaAsP

그림 4.7 기판의 형태와 성장온도에 따른 QW의 두께



(a) 1.3㎛ InGaAsP/InP층의 두께 (b) 1.1㎛ InGaAsP/InP층의 두께

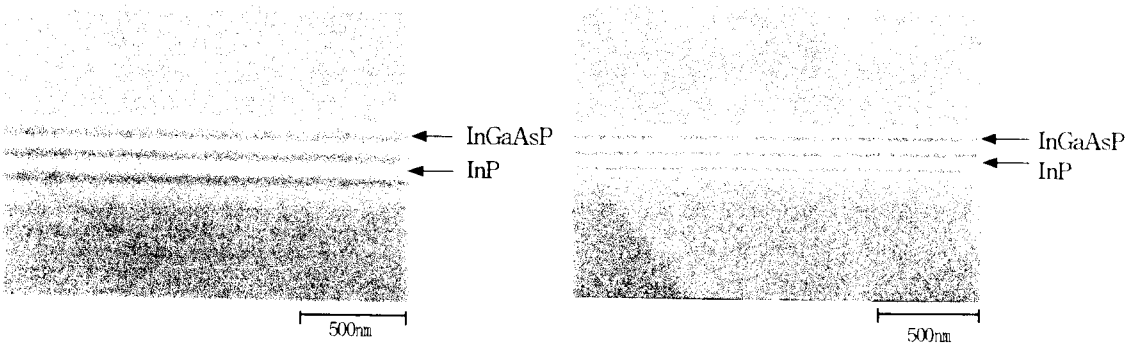
그림 4.8 기판회전의 흑연보트에 의한 MQW의 단면 SEM사진

이러한 실험으로 수직형 LPE 장치로도 100Å이하의 InGaAsP층을 얻을 수 있다는 아주 획기적인 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 InP seed 종류에 따른 MQW결정성장

본 연구에서는 InP seed가 실제로 초기과포화도를 어느 정도 감소시킬 수 있는가를 확인하기 위하여 InP과 poly crystal과 single crystal을 seed로 사용하여 실험해 보았다. 이러한 여러 번의 실험을 통한 평균치의 MQW층 SEM 단면사진이 그림 4.9이다. 그림 (a)는 poly crystal을 사용하였을 경우로 1.3㎛ InGaAsP층이 약 460Å, InP층이 약 600Å으로 나

dCollection



(a) InP seed를 poly crystal로 사용하였을 경우 (b) InP seed를 single crystal을 사용하였을 경우

그림 4.9 InP seed의 종류에 따른 MQW의 단면 SEM사진

타났으며 (b)의 single crystal의 경우 1.3㎛ InGaAsP층이 약 220Å InP층이 약 600Å로서 poly crystal에 비해 1.3㎛ InGaAsP층의 경우 약 240Å정도 얇아졌으며 양질의 성장계면을 보인다. 이러한 결과는 실험에 사용되는 기판과 같은 방향을 가진 single crystal의 polishing면과 용액을 접촉시키는 것이 poly crystal이나 polishing되지 않은 면을 접촉시키는 것보다 성장계면 특성이 더 좋은 것으로 생각되며, 2상용액법에 있어 용액 위에 떠 있는 InP의 경우도 성장이 일어나기 때문에 같은 면의 InP를 사용함으로써 기판과의 열평형 상태가 잘 유지되고 기판의 초기과포화도를 줄여 주어 InP poly crystal을 사용하였을 때보다 더욱 얇고 좋은 균일도를 가진 QW층을 성장시킬 수 있었다.

제 5 장 결론

본 연구에서는 InGaAsP/InP의 재현성 있고 균일한 결정성장을 위하여 기존의 수직형 LPE장치를 수정 보완하여 온도안정성과 고진공도를 유지할 수 있는 시스템을 구축하였고, 이것을 확인하기 위하여 bulk-LD를 제작하여 전기, 광학적 특성을 측정해 본 결과 상용화되어 있는 LD와 비견할 만한 값을 얻었다. 이렇게 개선된 수직형 LPE장치로 양질의 InGaAsP/InP MQW층을 성장시키기 위하여 성장용액의 회전의 흑연보트를 개선하여 새로운 구조의 흑연보트를 제작하였고 여러 가지 실험적인 방법을 제시하여 1.3㎛ InGaAsP, InP, 1.1㎛ InGaAsP층의 재현성 있고 균일한 100Å이하의 MQW층을 성장시켰다.

이러한 과정을 통하여 얻어진 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

[1] 액상결정성장시 양질의 에피층 성장 및 LD의 buffer층 과 QW의 성장두께를 정확히

dCollection

제어하기 위해서는 온도제어가 용이하고 매우 균일해야 한다. 따라서 본 연구에서 수정한 전기로에서 반응관의 외부와 중심과의 온도편차를 1℃, 반응관 원주방향으로의 온도편차를 ±0.05℃, 반응관의 온도흔들림을 ±0.02℃로 잡아 주었다.

[2] 또한 반응관과 가스라인의 진공도를 10^{-3}torr 까지 잡아 주어 반응관과 가스라인의 청결도를 유지하여 외부 불순물 유입으로 인한 활성층의 불순물 제어의 불가능을 방지하였다.

[3] 개선된 수직형 LPE장치의 성능 확인을 위한 bulk-LD를 제작해 본 결과 발진 임계전류는 1~2kA/cm^2, 내부 양자 효율 η_i=77%, 내부손실 α_{int} =28cm^{-1}와 특성온도 T_o =58K로 아주 양호한 특성을 보임으로서 상용의 LD와 비견할 만한 값을 얻었다.

[4] 개선된 LPE장치로 재현성 있고 균일한 MQW를 성장시키기 위하여 성장용액의 회전에 따른 성장용액의 rolling의 문제점을 해결하기 위하여 기판회전의 흑연보트를 제작하여 성장용액의 안정성을 확보하였고 InP single crystal을 사용하여 MQW를 성장시킨 결과 100Å 정도의 1.3㎛ InGaAsP층과 240Å 정도의 InP층을 얻었다. 그리고 80Å 정도의 1.1㎛ InGaAsP층을 성장시켰다.

이상의 결과로부터 본 연구를 통해 얻어진 LPE방법으로 100Å이하의 QW층을 성장시킨 것은 아주 고무적인 실험결과라고 할 수 있다.

그러므로 MQW-LD를 제작할 경우 본 연구에서 제작된 bulk-LD와 비교하여 성능이 아주 양호할 것으로 생각되며 향후 과제로 본 연구에서 개선된 수직형 LPE장치와 기판회전의 흑연보트를 사용하여 100Å 이하의 MQW층을 가지는 LD를 제작해 보고자 한다

참고문헌

1) 조호성, 오종환, 홍창희, "LPE에 있어서 InP기판의 열손상 상태와 Meltback 특성," *응용물리*, Vol.2, pp.278~283, 1989.

2) E.Pinkas, B.I.Miller, I.Hayshi and P.W.Foy, "GaAs-$As_xGa_{1-x}As$ double heterostructure lasers-dffect of doping on lasing characterics of GaAs," *J.Appl.Phys.*, vol.43, pp.2827~2835, 1972.

3) H.Kressel and J.K.Butler, Semiconductor Lasers and Hetrerojunction LEDs, *Academic Press*, 1977.

4) J.M.Senior, *Optical Fiber communications*, Prentice Hall, 1992.

dCollection

5) E.A.Rezek, H.Shichijo, B.A.Vojak and N.Holomyak, Jr.,"Confined-carrier luminescence of a thin $In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z$ well(x~0.13, z~0.29;~400Å) in an InP p-n junctions," *Appl.Phys.Lett.*, Vol.49, pp.69~74, 1978.

6) E.A.Rezek, N.Holonyak, Jr.B.A.Vojak and H.Shichijo, "Single and multiple thin layer (Lz≤400Å) $In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z$-InP ehterostructure light emitters and lasers(λ ~1.1㎛,7 7℃)," *J.Appl.Phys.*, Vol.49, pp.69~74, 1978.

7) E.A.Rezek, B.A.vojak and N.Holonyak,Jr., "Bandfilling in liquid phase epitaxial InP $In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z$-InP quantum-well heterostructure lasers," *J.Appl.Phys.*, Vol.49, pp.5398~5403, 1978.

8) A.Accard, J.Benoit and R.Vergnaud, "LPE growth of InP thin layer from super-cooled solutions by the two-phase techinque," *J.Crystal Growth*, Vol.54, pp.45~50, 1981.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

dCollection

Collection