

DVD용 650nm InGaP/InGaAlP 레이저 다이오드

김 동 환, 장 준 호, 유 태 경

LG종합기술원 소자재료연구소

I. 서 론

지금은 DVD란 이름으로 보편화 되어있지만, 적색 레이저 다이오드 개발을 시작하려는 시기인 80년대 초에는, CD-ROM보다 고밀도 디스크 장치용을 위한 반도체 레이저 대한 개발 요구로 단순히 레이저의 파장을 짧게 하려는 노력이 있었다. 지금은 650nm 레이저 다이오드가 사용되고 있지만 초기에는 그 당시 당연한 상식 이었던 (100) GaAs 기판 위에 InGaAlP/InGaP 결정 구성에 의한 680nm 레이저 다이오드부터 개발이 시작되었고, 1985년 처음 상용 연속 발전 후 90년대 초까지 InGaAlP/InGaP의 물질 특성을 파악하지 못하여 여러 가지의 다양하고 불안한 특성에 대한 실험 결과들이 발표되었다. 그러나 돌이켜 보면 그런 다양한 결과들은 metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) 결정 중에 생겨나는 문제를 해결하지 못했기 때문이다. 한 가지 예를 들면 89년 이 분야 기술 전문가와 적색 레이저의 기술개발에 관해 상의를 한 적이 있었는데, 한 두시간을 열심히 설명한 것의 결론은 광 특성의 불안정성이었다. 그러나 지금 생각해 보면 그것은 InGaP의 disordering에 대한 명확한 이해 없이 고생한 경험을 열심히 설명한 것이었다. InGaAlP/InGaP 레이저 개발의 전환점은 InGaP의 ordering을 제거하는 기술, InGaP 양자 우물의 변형(strain) 특성 최적화, 및 InGaAlP 클래드 층의 barrier를 어떻게 증가 시키는 것인가의 개발 역사로 볼 수 있다.

DVD용 레이저 다이오드 개발 중에 흥미 있었던

issue 중의 하나가 레이저 다이오드의 파장을 얼마로 할 것인가에 대한 것으로 DVD 규격 경쟁에서 일본의 S사는 635nm를 주장하였고, T사는 650nm 이었다. 파장으로는 얼마의 차이가 되지 않지만 그 당시는 전체 밀도를 약 5%정도 좌우하는 것으로 광학계 구성하는 측면에서 기선을 잡으려는 것이 레이저 다이오드를 개발하는 사람에는 마지막 한계를 요구하였던 것이다. S사는 규격에서 밀린 이후로 635nm 레이저를 포기하였던 것 같고, 따라서 지금도 635nm 레이저를 개발할 수 있는 회사는 1~2개로 줄어들었다. 본 연구실에서는 덕분에 두 가지 레이저를 다 개발해야 하는 고초를 겪었는데 이 과정을 통하여 InGaAlP/InGaP 레이저에 대한 기술을 어느 연구소보다 많이 확보하였다고 본다.

한편 또 다른 기술적 요구는 InGaAlP/InGaP 레이저를 실제 DVD 광학계에 적용 시 생겨난 문제들로써, 레이저 다이오드의 수평 방사각을 CD-ROM 레이저 다이오드만큼 확장 시키는 기술과 디스크로부터 반사광에 의한 잡음을 제거하는 자려 발진 레이저라 할 수 있다. 레이저의 수평 방사각 문제는 레이저 신뢰성 확보를 위해 반드시 필요한 경사진 기판(약 15도~22도)위에 waveguide를 형성할 때 생기는 ridge의 비 대칭으로부터 파생하는 것으로, 레이저와 렌즈계 설계 및 광학 손실과 연계되어 동작 출력을 합의해야 했다. 예를 들면 수평 방사각이 8도 이면 동작 출력이 5mW가 필요하고 9도 이상이면 3mW도 가능하다는 것이었다. 3mW 출력과 5mW출력을 70℃ 온도에서 보장하는 것은 상당한 차이였다. 특히

InGaAlP 레이저는 열 특성이 상당히 열악하여 고온 동작 보증은 대단한 난이도의 요구 사항이었다. 그 당시 3mW 와 5mW는 출력 향상은 동일 수율 조건에서 5~10°C 온도 차이로 평가되었다. 635nm 레이저는 약 60°C 동작 온도가 그 당시 최고 수준이었는데, 아직도 그 보다 상위 신뢰성의 레이저를 찾는다는 것은 그리 쉬운 일이 아니다. 일본 1개 회사가 이 제품을 고가로 계속 생산하고 있는 것으로 안다. 635nm 레이저와 650nm 레이저의 차이는 수율과 신뢰성 최종 보장 온도 차이인 것 같고, 이런 특성을 기준으로 광학계를 필요에 따라 응용하여 사용하면 될 것이다.

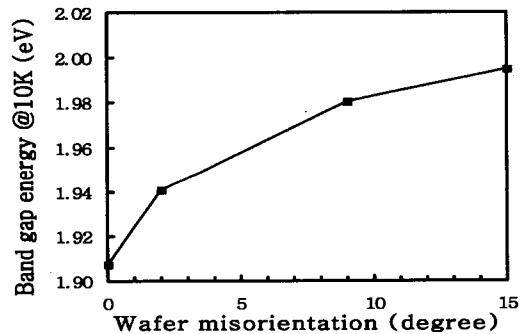
600nm대의 가시광을 낼 수 있는 물질계로는 AlGaAs, InGaAsP, InGaP/InGaAlP계등이 있으나 이 중 가장 큰 직접 천이 band gap energy를 가지고 변형 효과를 적용할 수 있는 InGaP/InGaAlP계 물질이 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 레이저 다이오드 제작에 적합한 고품질의 InGaP/InGaAlP계 물질을 성장 시키는 방법으로는 molecular beam epitaxy (MBE), 또는 gas source MBE, MOCVD를 이용한 증착법이 있는데 MOCVD를 이용한 성장법이 널리 쓰이고 있는 바 이 글에서는 주로 MOCVD를 이용한 650nm 레이저 다이오드 개발에 있어 중요한 사항들과 그 결과를 다루려고 한다.

II. 본 론

1. InGaP/InGaAlP계 물질의 특성

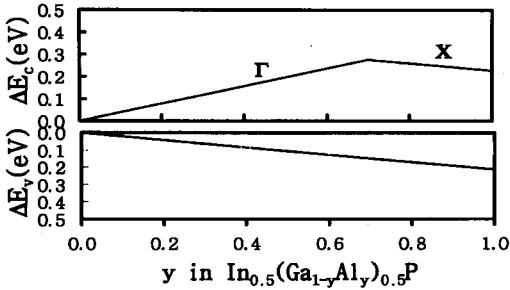
$In_{1-x}Ga_xP$ 는 x 에 따라 각기 다른 band gap energy와 격자 상수를 가지는데 $x \sim 0.5$ 에서 GaAs와 동일한 격자 상수를 가지게 된다. MOCVD에 의해 성장된 InGaP는 일반적으로 성장 조건에 따라 다양한 band gap energy를 가지고 있는 것으로 알려져 있는데 성장 조건에 따라 70~100meV의 차이를 보인다. 낮은 band gap energy를 가지는 InGaP의 경우 transmission electron microscope(TEM)에 의해 확인된 바에

따르면 [111]방향을 따라 In-rich, Ga-rich plane이 교대로 반복되는 long-range ordering이 있는 것으로 밝혀졌다.^[1] 이 ordering의 정도는 성장 온도, V/III비, 성장율, 또는 기판의 기울어짐^[1,2]에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 기판의 기울어짐에 따른 10K에서 photoluminescence (PL)에 의해 측정된 InGaP의 band gap energy를 보여 주고 있다. 이 InGaP들은 [011]쪽으로 기울어진 (001) GaAs기판 위에 성장 온도 720°C, V/III비 >400, 성장율 $\sim 2 \mu\text{m/hr}$ 조건에서 성장된 것들로 GaAs 기판에 대해 $|\Delta a/a| < 10^{-3}$ 의 격자상수 mismatch를 가지고 있다. 그림 1에서 기판의 기울어짐이 커짐에 따라 band gap energy가 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 기판의 기울어짐이 증가함에 따라 ordering 정도가 감소하기 때문이다.



(그림 1) (001) GaAs 기판의 [011] 방향으로 기울어짐에 따른 $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ 의 10K에서의 band gap energy.

650nm 레이저 다이오드의 구속층이나 클래딩 층에는 $In_{0.5}(Ga_{1-y}Al_y)_{0.5}P$ 이 사용된다. $In_{0.5}(Ga_{1-y}Al_y)_{0.5}P$ 의 band gap energy는 y 값이 증가함에 따라 커지는 경향을 가지나 간접 천이 X valley가 y 값 0.7이상에서 직접 천이 Γ valley보다 적은 band gap energy를 가짐에 따라 0.7이상의 y 값을 가지는 $In_{0.5}(Ga_{1-y}Al_y)_{0.5}P$ 는 간접 천이 특성을 가지게 된다. 그림 2는 y 값에 따른 $In_{0.5}Ga_{0.5}P/In_{0.5}(Ga_{1-y}Al_y)_{0.5}P$ 계의 band offset을 보여주고 있다. y 가 0.7에 이상에서는 가전자대의 offset은 계속



(그림 2) y 값에 따른 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}/\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y)_{0.5}\text{P}$ 의 band offset.

증가하는 반면 전도대의 band offset은 감소함을 보여준다. 따라서 일반적으로 클래딩 층에는 전도대의 band offset이 최대인 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 가 사용된다. $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y)_{0.5}\text{P}$ 또한 TEM에 의해 확인된 바로는 성장 조건에 따라 ordering을 가지는 것으로 확인되었으나 x 가 0.5이상의 값을 가질 때에는 band gap energy가 ordering에 따라 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다.^[3] $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y)_{0.5}\text{P}$ 의 굴절률은 y 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 따라서 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}/\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y)_{0.5}\text{P}$ 계를 사용한 이중 결합 구조는 전자 및 정공뿐만 아니라 빛을 구속하는 데에도 적합하다. InGaP/AlGaInP계 레이저 다이오드는 가능한 최대 전도대 band offset이 270meV로 그 값이 350meV 정도인 GaAs/AlGaAs계 레이저 다이오드에 비해 활성층과 p클래딩 층 사이의 전자 장벽 높이가 낮음에 기인하는 큰 누설전류와 큰 열 저항 때문에 AlGaAs계 레이저 다이오드에 비해 고온 동작, 고출력 동작, 장기 신뢰성 등에 있어서 특성이 좋지 않는 것으로 알려져 있다.

압축 변형(compressive strain)을 가진 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}(x < 0.5)$ 을 사용한 양자우물을 사용함으로써 InGaP/InGaAlP계 레이저 다이오드에서의 문턱 전류, 고온 동작 등의 특성에 큰 향상을 얻을 수 있다. 압축 변형을 가진 InGaP의 경우 계면을 따라서는 기판의 격자에 따라 격자 상수가 줄어드는 반면 계면과 수직인 방향으로 Poisson 비에 따라 격자 상수가 늘어나게 된다. 이런 단위 격자의 변형은 energy band gap을 증가 시키고, 가전

자대의 구조를 변화시켜 $k=0$ 에서의 heavy hole과 light hole band가 갈라지게 한다. 또한 압축 변형은 heavy hole의 유효 질량을 줄여 가전자대의 density of state를 감소시킨다. 이것은 transparency density를 감소 시키고 differential gain을 향상 시킨다. 따라서 낮은 문턱 전류, 양호한 광전 특성이 가능하게 되는 것이다.^[4] InGaP에 압축 변형이 가해진 경우 heavy hole이 기저 상태가 됨에 따라 650nm 레이저 다이오드에서 발생하는 빛은 electron과 heavy hole의 결합에 따른 것이고 TE편광 특성을 가지게 된다. 참고로 635nm 레이저 다이오드의 경우는 일반적으로 인장 변형(tensile strain)을 가지는 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}(x > 0.5)$ 을 양자 우물에 사용하게 되고 이 경우는 light hole이 기저 상태가 되고 TM편광 특성을 가지게 된다.

1. 층 구조 및 소자 구조

Optical pickup 응용을 위해서는 레이저 다이오드로부터 나온 빛이 가능한 한 작은 크기의 상을 가져야 한다. 물론 이 상의 크기는 사용되는 광원의 파장과 초점을 맞추는데 사용된 렌즈의 초점 길이에 달려 있지만 또한 그 광학계의 비점수차(astigmatism)에 의해서도 영향을 받는다. 비점수차를 가지고 있는 광학계에서의 상의 크기는 비점수차가 없는 광학계에서의 상의 크기보다 크게 된다. 일반적으로 레이저 다이오드를 채용한 광학계에서의 비점수차는 많은 부분은 레이저 다이오드에서 나오는 빛의 자체 특성에서 기인한다. 이는 레이저 다이오드의 p-n 접합에 수평한 면과 수직면의 빛이 각기 다른 방법에 의해 구속되기 때문이다. 레이저 다이오드의 p-n 접합에 수직면에서는 활성층, 광 구속층, 클래딩층이 서로 다른 조성을 가진 물질로 이루어져 있고 그 물질들의 굴절률 차이가 광구속을 직접적으로 유도하는 반면 레이저 다이오드의 p-n 접합과 수평한 면에서는 레이저 구조에 따라 정도의 차이가 있지만 일정 정도의 gain guiding현상과 함께 ridge 부분과 바깥 부분의 허수부를 가지는 유효 굴절률 차이에 의해 광구속이 일어난다. 이에 따라 수직 방향으로

는 레이저 다이오드의 벽개면에 beam waist가 형성되는 반면 수평 방향으로는 공진기 내에 beam waist가 형성 된다.^[5] 이와 같은 두 평면상에서의 서로 다른 beam waist의 위치로부터 비점수차가 발생한다. p-n 접합 계면에 평행한 방향으로 유효 굴절률 변화에 따라 광구속이 일어나는 n-GaAs를 전류 차단층으로 사용한 buried ridge waveguide(BR) 구조의 경우 비점수차가 $15\mu\text{m}$ 내외인데 비해 gain guiding에 의해서만 광구속이 일어나는 inner stripe등의 구조의 경우는 그 값이 $50\mu\text{m}$ 내외가 된다. 또 유효 굴절률의 실수부의 차이에 의해 광구속이 가능한 real index guiding 구조의 경우는 $2\mu\text{m}$ 이내의 작은 비점수차를 가지는 것으로 보고되고 있다. 비점수차를 줄이기 위해서는 교정 광학계를 사용하여야 하므로 될 수 있으면 작은 비점수차를 가지는 레이저 다이오드 구조를 사용하는 것이 바람직하다.

BR 구조를 채용할 separate confinement heterostructure(SCH) 650nm 레이저 다이오드를 제작하기 위해 다음과 같은 epi 층을 성장 하였다. [011] 방향으로 기울어진 (001) n-GaAs 기판 위에 n-GaAs 버퍼 층(전자 농도 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$), n- $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 클래딩 층 $1\mu\text{m}$ (전자 농도 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$), $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5})_{0.5}\text{P}$ 구속층(guiding layer) 1500\AA , 양자 우물을 포함한 활성층, $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5})_{0.5}\text{P}$ 구속층 1500\AA , p- $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 1차 클래딩 층 1500\AA (정공농도 $\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$), p- $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{P}$ 에치 스톱층(정공농도 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$) 80\AA , p- $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 2차 클래딩 층 8000\AA (정공농도 $\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$), p- $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 접촉 버퍼층 1000\AA (정공농도 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$), p-GaAs 접촉층(정공농도 $>10^{18}\text{cm}^{-3}$)들이 차례로 성장되었다. 이 층들은 저압 MOCVD 증착법에 의해 성장되었으며 TMGa 또는 TEGa, TMAI, TMIIn를 III 족원으로 PH_3 , AsH_3 를 V족원으로 그리고 n-dopant source로는 SiH_4 , p-dopant source로는 DEZn가 각각 사용되었다. 성장 온도는 $700^\circ\text{C}\sim 720^\circ\text{C}$ 가 사용되었는데, 단 p-GaAs 접촉층은 정공 농도를 높이기 위해 620°C 정도에서 성장되었다. p- $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{P}$ 에치 스톱층은 ridge형성 공정

의 용의성을 위해 삽입된 층으로써 클래딩 층으로 쓰인 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 보다 적은 band gap energy를 가지는 InGaP의 영향을 최소화 하고자 인장 변형을 가지는 조성이 사용되었다. 또 p- $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 접촉 버퍼층은 큰 band gap energy 차이를 가지는 p- $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 클래딩 층과 p-GaAs 접촉층 사이의 전류 흐름을 돕기 위해 삽입된 것으로 동작 전압을 낮추는데 큰 역할을 한다.

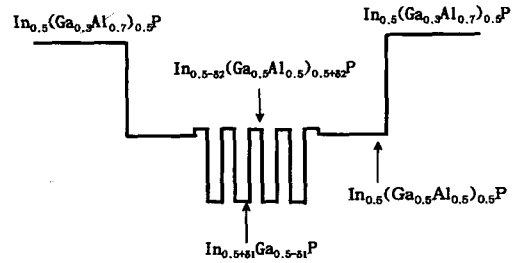
압축 변형을 가진 양자우물을 사용한 SCH InGaP/InGaAlP계 가시광 레이저 다이오드의 열 특성을 결정하는 가장 중요한 요인 중 하나는 광구속 영역과 p 클래딩 층 계면에서의 전도대 장벽의 높이이다. 이 높이는 광구속 영역과 p 클래딩 영역의 전도대 에너지 차이와 p 클래딩 영역의 정공 농도에 의해 결정된다. $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 를 p 클래딩 층 물질로 쓸 경우 p-doping 물질로 쓰인 Zn의 activation energy가 Al조성이 증가 할수록 커지기 때문에 효과적인 p-doping이 어려워진다.^[6] 단순히 높은 정공 농도를 유지하기 위해 Zn의 incorporation을 증가시킬 경우 interstitial Zn의 비율이 높아짐으로 해서 레이저 다이오드 제작시 p 클래딩 층으로부터 활성층으로의 Zn 확산이 심하게 일어나 소자의 특성에 악영향을 미치게 된다. 따라서 좋은 열 특성을 가진 레이저 다이오드를 얻기 위해서는 정공 농도를 최적화 하는 것이 필수적이다. Zn를 사용 하였을 때 효과적으로 정공 농도를 높이는 방법 중의 하나는 [011]방향으로 기울어진 (001) GaAs 기판을 사용하는 것이다. 이는 [011]방향으로의 경사에 따라 증가하는 (111)A면에서 의해 Zn incorporation이 증가 할 뿐 만 아니라, 정공 농도에 영향을 미치는 결정 내의 산소 함유량이 기울어짐을 가지는 기판에서는 줄어들어 정공 농도를 높일 수 있기 때문이다.^[7] 또한 epi 성장 후에 수소 분위기에서 행하는 in-situ thermal annealing이 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 또는 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}$ 의 정공 농도를 크게 높이는 것으로 알려져 있다.^[8] 15도 기울어진 기판을 사용 하였을 때 수소 분위기에서의 annealing을 거친 후의 정공 농도는 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7})_{0.5}\text{P}$ 경우 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 까지 얻을 수 있었다.

또한 기판의 기울어짐이 증가함에 따라 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 간의 계면의 균일도가 좋아지는 것이 보고된바 있다.^[9] 이는 기판의 기울어짐이 증가함에 따라 terrace의 길이가 짧아져 III족 원자들이 terrace의 끝까지 움직여 step에서 첨가 될 확률이 높아져 성장 방식이 3차원 성장 방식(three dimensional growth mode)에서 step flow growth mode로 바뀔에 따른 것으로 설명할 수 있다. 단 기판의 기울어짐이 25도 이상으로 증가하게 되면 표면상의 dangling bond의 수가 2개에서 3개로 증가함에 따라 표면에 다다른 III족 원자들이 terrace를 따라 이동하기 보다는 제자리에서 첨가됨에 따라 성장 방식이 다시 3차원 성장 방식으로 변하게 되고 계면의 균일도가 다시 감소하게 된다.

위에 언급된 바와 같이 기울어짐을 가지는 GaAs 기판은 1)InGaP의ordering 생성을 억제하고, 2) Zn를 사용하였을 때 효과적인 p 도핑을 가능하게 하고, 3)보다 균일한 양자우물 계면을 가지게 하여 MOCVD를 이용한 가시광 레이저 다이오드 제작에 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 점들을 고려하여 이후에 기술되어 있는 650nm 레이저 다이오드들은 [011]방향으로 15도 기울어진 (001) GaAs 기판을 사용하여 제작된 것들이다.

압축 변형을 가지는InGaP의 경우 변형 효과에 의해서는 band gap energy가 증가하나 과도하게 들어간 In때문에 전체적인energy band gap이 줄어들게 된다. 따라서 압축 변형을 가지는 물질을 이용하여 650nm대의 발진 파장을 가지는 레이저 다이오드를 제작하기 위해서는 양자우물을 활성층에 사용하여야 한다. 변형 0.8~1.0%를 가지는 InGaP를 양자우물 물질로 사용할 경우 650nm대 파장을 가지기 위한 일반적인 양자우물의 두께는 50Å내외로 이런 좁은 gain medium을 사용함에 따라 줄어든 optical confinement를 보상하기 위하여 다중 양자 우물(multiple quantum well)을 활성층에 사용하였다.

그림 3는 압축 변형을 가지는 양자우물 4개를 가지는 SCH 650nm 레이저 다이오드의 활성층 구조를 나타낸다. 4개의 양자우물을 채용한 경우 0.8

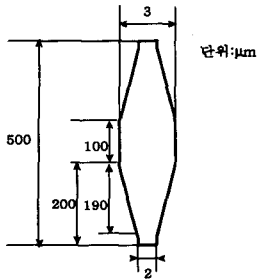


(그림 3) 다중 양자우물 구조를 가지는 650nm 레이저 다이오드의 활성층 구조

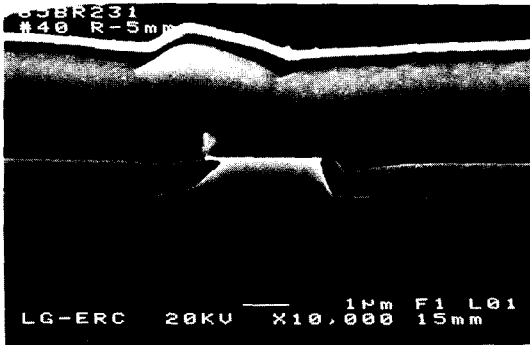
%~1.0% 변형 부근에서 최적의 레이저 다이오드 특성을 가지는 것으로 나타났다. 양자 우물의 개수를 줄이면 발진 개시 전류가 감소하지만 양자 우물 당 발진 개시 전류 세기는 증가한다. 따라서 열 특성은 양자 우물의 개수가 감소할 수록 악화된다. 따라서 최적의 양자 우물 개수는 요구 되는 발진 개시 전류의 값과 온도 특성의 절충에 의해 결정된다.^[10] 또한 그림 3에 나타난 바와 같이 barrier와 구속층의 일부 영역에 양자 우물에서의 변형과 반대인 인장 변형을 가지는 strain compensate layer(SCL)를 삽입하였다. SCL층은 635nm 레이저 다이오드 제작에 사용되어 발진 개시 전류를 줄일 수 있음이 증명 되었을 뿐만 아니라^[11] 압축 변형을 가지는 다중 양자 우물 구조에도 도입되어 신뢰성을 향상 시키는 것이 보고된바 있다.^[12] 사용된 SCL의 두께는 60Å, 변형은 -0.3 ~ -0.5%였다.

3. 소자 제작 및 그 특성

성장된 epi를 이용하여 BR구조를 가진 레이저 다이오드를 제작하였다. 전류 차단층과 전류 집속층에는 n-GaAs, p-GaAs가 사용되었다. 작은 수직방사각/수평 방사각 비를 가지기 위해서는 활성층 구조를 최적화 하여 수직 방사각을 적게 하고 좁은 폭을 가지는ridge를 제작하여 수평 방사각을 크게 하여야 한다. 일반적으로 ridge형성 습식 식각 공정을 이용하게 되면 일정 폭 이하의 좁은 ridge를 구현하는데 한계가 있다. 이 때문에 electron cyclotron resonance reactive ion etching (ECR RIE)를 이용한 건식 식각 공정이

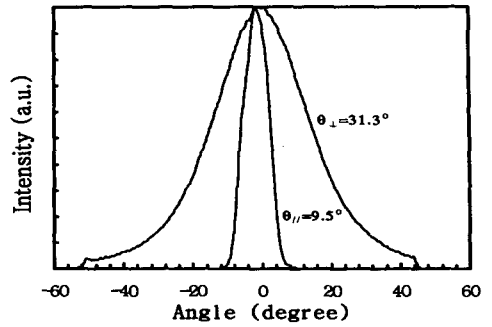


(a) Tapered ridge의 구조



(그림 4) (b) 이를 이용해 제작된 BR 구조를 지닌 650nm 레이저 다이오드의 단면 SEM 사진

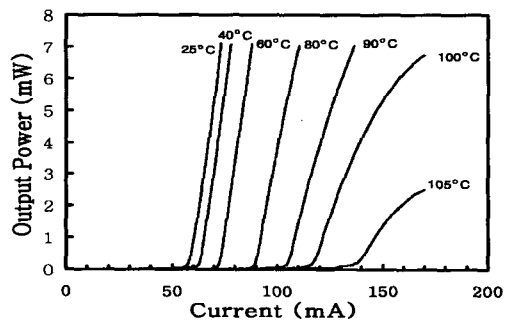
도입 되었다. 우선 ECR RIE를 이용하여 에치 스톱층 위의 잔여 p-InGaAlP 2차 클래딩 층의 일부를 식각 하고 잔여 2차 p 클래딩층은 습식 식각을 사용하여 제거하였다. 이러한 식각 공정의 적용 결과 바닥 부분의 ridge 폭을 줄일 수 있었고 이에 따라 3 μm photo mask를 이용하여 ridge를 제작하였을 경우 수평 방사각이 습식 식각을 이용 하였을 때의 7~7.5도에서 8~8.5도로 증가 되었다. ECR RIE 건식 식각 방법을 ridge형성 공정에 도입함으로써 ridge폭을 더욱 줄일 수 있는 여지는 남아있지만 더 이상의 ridge폭 감소는 광 이득에 손실을 주는 것으로 밝혀졌다. 이에 따라 광전 특성은 유지 시키면서 수평 방사각을 증가시키기 위해 ridge의 폭이 공진기 길이에 따라 다른 값을 가지는 tapered ridge 구조를 도입하였다. Tapered ridge의 구조와 실제 제작된 BR구조를 지닌 소자의 secondary electron microscope(SEM) 단면 사진이 그림 4에 나타나 있다. Tapered ridge구조를



(그림 5) Tapered ridge를 채용한 650nm 레이저 다이오드의 방사각 특성

소자 제작에 적용 시킨 결과 최고 9.5도의 수평 방사각을 얻을 수 있었다. 그림 5는 제작된 소자의 방사각 특성을 보여 주고 있다. 수직방사각/수평 방사각 비는 3.3으로 양호한 값을 보이고 있다.

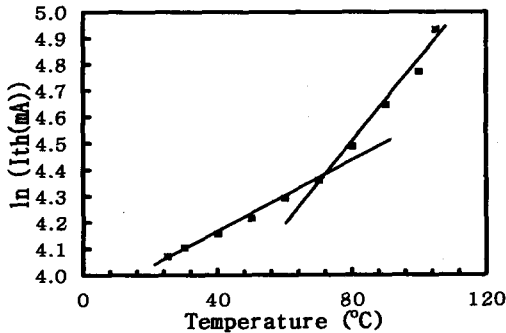
이제 다이오드의 열 특성을 평가하는 방법으로는 최대 구동 온도를 측정하는 방법이 있다. 레이저 다이오드의 온도 변화에 따른 실험 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6으로부터 온도가 증가함에 따라 발진 개시 전류가 증가하고, 어느 온도 이상에서는 광 전류의 특성 곡선이 직선 형태에서 곡선 형태로 변화하고 있음을 알 수 있다. 온도에 따르는 발진 개시 전류의 변화를 식(1)과 같이 T_c (characteristic temperature)로 정의되는 계산치를 사용하여 특정화 시킬 수 있다. 이때 $I_{th}(T)$ 는 절대온도 T에서의 발진 개시 전류 값이고 I_{th0} 는 상수이다.



(그림 6) 650nm 레이저 다이오드의 온도에 따른 광전 특성 변화

$$I_{th}(T) = I_{th0} * \exp(T/T_0) \quad (1)$$

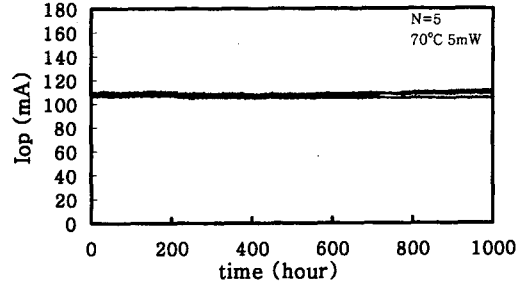
레이저 다이오드의 온도 변화에 따른 광 특성의 변화가 적을수록 T_0 가 큰 값을 가지게 된다. 그림 7에 온도에 따른 발진 개시 전류 값을 자연 로그 값으로 나타내었는데 대체로 70°C 를 경계로 하



(그림 7) 650nm 레이저 다이오드의 온도에 따른 동작 개시 전류 변화

여 그 기울기가 다름을 알 수 있다. $25^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 영역에서의 T_0 값은 156K, $70^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 영역에서는 T_0 값이 대략 73K로 계산 되었다. 특히 70°C 이상에서는 발진 개시 전류의 온도에 따른 증가가 온도가 상승함에 따라 더욱 커짐을 볼 수 있다. 이런 온도 영역에 따라 T_0 가 다른 값을 가지고 온도가 상승할 수록 작은 T_0 값을 가지는 것은 광구속 영역과 p 클래드 영역의 작은 전도대 에너지 차이 때문에 누설 전류가 고온에서는 빠르게 증가함에 따른 것이다. InGaP/InGaAlP계 가시광 레이저 다이오드의 경우는 p 클래드에서의 누설 전류 중 drift 성분이 diffusion 성분보다 주도적인 것으로 알려져 있다.^[13] 따라서 p 클래드의 높은 정공 농도는 광구속 층과 p 클래드 층 계면에서의 전도대 장벽의 높이를 높일 뿐 더러, p 클래드에서의 전기장의 세기를 낮춤으로써 drift 누설전류 성분을 줄여 전체 누설전류를 줄이는데 큰 역할을 한다.

신뢰성은 제작된 소자가 실제의 제품으로서 가지는 특성 중 가장 중요한 것의 하나이다. 제작된 소자의 신뢰성을 평가하기 위하여 일정한 광 출력으로 구동하는 APC(Automatic Power Control) mode에서 5mW 70°C 조건으로 고온 가속 수명 실험



(그림 8) 70°C , 5mW 조건에서의 650nm 레이저 다이오드의 신뢰성 실험 결과

험을 하였다. 실험에 사용된 레이저 다이오드들은 $500\mu\text{m}$ 공진기 길이에 앞 벽개면은 passivation coating, 뒷 벽개면은 HR coating 되어 있었다. 그림 8.에서 볼 수 있는 바와 같이 70°C 5mW 동작 조건에서 1000시간이 경과 할 때까지 안정적으로 동작하고 있음을 볼 수 있다.

III. 결 론

위에서 살펴 본 바와 같이 InGaP/InGaAlP계를 사용한 650nm 가시광 레이저 다이오드 제작에 필요한 층 구조의 성장에 있어 중요한 점으로는 1) InGaP에서의 ordering 형성 억제, 2) 효율적으로 도핑된 p-클래딩 층의 높은 정공 농도, 3) 최적화된 압축 변형을 가진 양자우물의 도입 등을 들 수 있다. InGaP의 ordering 형성을 억제하고, 효율적인 p형 도핑을 가능하게 하는 기울어짐을 가진 GaAs 기판의 채용은 650nm 가시광 레이저의 제작에 있어 매우 중요한 의미를 가진다. 일반적인 광전 특성과 더불어 DVD용 optical pick-up 응용에서는 수직/수평 방사각의 비, 비점수차등 레이저의 광학적 성질이 중요한 역할을 한다. 위의 사항들을 고려하여 tapered ridge를 가진 BR 구조를 채용한 650nm 레이저 다이오드를 제작한 결과 작은 수직/수평 방사각 비를 가지고 70°C 5mW에서 1000시간이상을 안정적으로 동작하는 DVD player 또는 DVD ROM에 사용 가능한 650nm

레이저 다이오드를 제작할 수 있었다. DVD-rewritable 또는 DVD-RAM에 사용할 수 있는 30mW급 고출력 레이저 다이오드의 제작을 위해서는 좀 더 최적화된 성장 조건, 다중정호 (multi-quantum barrier) 구조 채용 등에 의한 열 특성 개선과 catastrophic optical damage 수준을 높이기 위한 활성층 변화 및 비흡수 벽개면의 도입 등이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] A. Gomoyo, T. Suzuki, K. Kobayashi, S. Kawata, L. Hino, and T. Yuasa, "Evidence for the existence of an ordered state in $\text{GaGa}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ grown by metalorganic vapor phase and its relation to band-gap energy", *Appl. Phys. Lett.* 50, 673 (1987).
- [2] L.C. Su, H. Ho, G.B. stingfellow, "Ordering in GaInP grown at low temperatures", *J. crystal Growth* 146, 558 (1995).
- [3] C. Nozaki, Y. Ohba, H. Sugawara, S. Yasuami, and T. Nakanisi, "Growth temperature dependent atomic arrangement and their role on band gap of InGaAlP alloys grown by MOCVD", *J. crystal Growth* 93, 406 (1988).
- [4] Edited by Peter S. Jory, Jr, *Quantum Well Laser*, chapter 1, Academic Press, (1993).
- [5] Bohdan Mrozwicz, Maciej Bugajski, and Wlodzimierz Nakwaski, *Physics of Semiconductor Lasers*, North-Holland, p. 252,(1991).
- [6] D.P. Bour, R.S. Geels, D.W. Treat, T.L. Paoli, F. Ponce,R.L. Thornton, B.S. Krusor, R.D. Bringans, and D.F. Welch, "Strained $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/(\text{AlGa})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ hetero-structures and quantum laser diodes", *IEEE J. Quantum Electron.* 30, 593 (1994).
- [7] M. Kondo, C. Anayama, N. Okada, H. Sekiguchi, K. Domen, and T. Tanahashi, "Crystallographic orientation dependence of impurity incorporation into III-V compound semiconductors grown by metalorganic vapor phase epitaxy", *J. Appl. Phys.* 76, 914 (1994).
- [8] Won-Jin Choi, Ji-Ho Jang, Won-Taek Choi, Seung-Hee Kim, Jong-Seok Kim, Shi-Jong Leem, and Tae-Kyung Yoo, "Hydrogen effect on 670-nm AlGaInP visible laser during high temperature operation", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 1, 717 (1995).
- [9] Minoru Watanabe and Masaki Okajima, "Dependence of $\text{InGaP}/\text{InGaAlP}$ hetero-interface smoothness on substrate misorientation", *J. Appl. Phys.* 80, 3291 (1996).
- [10] Minoru Watanabe, Hatsumi Matsuura, Naohiro Shimada, and Hajime Okuda, "Optimum tensile-strained multiquantum-well structures of 630nm band InGaAlP lasers for high temperature and reliable operation", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 1, 712 (1995).
- [11] Won-Jin Choi, Jong-Seok Kim, Meoung-Whan Cho, In-Sung Cho, Shi-Jong Leem, and Tae-Kyung Yoo, "Very low threshold current 630nm band AlGaInP single quantum well laser with strain compensated layers", presented at the 22nd International Symposium on Compound Semiconductor, Cheju Island, Korea (1995).
- [12] A. Valster, A.T. Meney, J. R. Downes,

D.A. Faux, A.R. Adams, A.A. Brouwer, and A. J. Corbijn, "Strain-compensated GaInP-AlGaInP quantum well laser structures for improved reliability at high output powers", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 3, 180 (1997).

[13] David P. Bour, David W. Treat, Robert L. Thornton, Randall S. Géels, and David F. Welch, "Drift leakage current in AlGaInP quantum well lasers", IEEE J. Quantum Electron. 29, 1337 (1993).

저 자 소개



金東煥

1965년 7월 21일생, 1988년 2월 서울대학교 물리교육학과 졸(학사), 1991년 5월 SUNY at Buffalo 물리학과 졸(석사), 1992년 5월 SUNY at Buffalo 전기공학과 졸(석사), 1996년 2월 SUNY at

Buffalo 전기공학과 졸(박사), 1996년 1월~현재 LG종합기술원 소자재료연구소 선임 연구원, <주관심 분야: 화합물 반도체 성장, 광소자 제작 및 설계>



張峻豪

1967년 11월 29일생, 1994년 2월 서울대 전자공학과 졸, 1996년 2월 서울대 전자공학과 대학원 졸, 1996년 2월~1997년 12월 LG종합기술원 Devices & Material LAB에서 visible(650nm) LD 개

발, 1998년 1월~현재 GaN Blue LED 개발중, <주관심 분야: Semiconductor lasers>



劉泰京

1960년 3월 6일생, 1983년 2월 서울대학교 전자공학과 졸(학사), 1985년 2월 한국과학기술원 전자공학과 졸(석사), 1989년 8월 한국과학기술원 전자공학과 졸(박사), 1989년 1월~1991년 10월

금성중앙연구소(현 LG 종합기술원) 선임 연구원, 1991년 11월~1992년 10월 코넬대학(미국) 연구원, 1992년 11월~1993년 3월 Bell core 연구소 방문 연구원, 1993년 4월~현재 LG종합기술원 OE 그룹 연구실장, <주관심 분야: 화합물 반도체 광소자 및 공정, 소자 광학특성 평가>