

광통신용 LD 제작

추 안 구

삼성종합기술원 광전자 Lab.

I. 서 론

광통신망을 구성하는 방식 및 종류에 따라 서로 다른 LD(laser diode)가 사용된다. 통신망은 거리에 따라 long- (기간망), medium- (metropolitan area network: MAN), short-haul (datacomm 과 광가입자망)으로 분류되는데 먼저, long haul 에는 SONET OC-48(2.5Gbps/s) 혹은 SONET OC-192 (10Gbps/s) 대역폭의 LD모듈을 사용하며 100GHz의 ITU(International Telecommunication Union) grid의 광원 구입이 가능하고, 최근 50GHz 간격의 광원도 출시가 시작되었다. Long haul용 광통신 시스템은 D-WDM (dense wavelength division mutiplexer) 통신망으로 자리 매김을 하였고(일본은 예외), OC-48 수준의 64 channel (Pirelli's WaveMux), 80 channel (Lucent's WaveStar)와 OC-192로 40 channel (Lucent)의 시스템 구입이 가능하다. 최근에 Lucent (100 channel @ 10Gbps)와 NTT (50 channels @ 20Gbps)에서 1Terabps 통신 장비를 선보인바 있다. 여기에 사용된 광원의 대역폭은 2.5Gbps와 10Gbps이고 여러 형태로 광원구입이 가능하다. 광원은 DFB-LD에 의한 직접변조, EML (electroabsorptive modulator integrated DFB-LD), cw (continuous wave) DFB (distributed feedback)-LD와 결합한 LiNbO₃변조기나 광전흡수 변조기로 신호를 coding하는 세가지 방식이 있다. 여기서 DFB-LD는 공통적이고 직접변조용과 연속파 광원용은 제조과정이 다를 수 있다. WDM 방식에 사용된 LD모듈은 ITU grid를 만족해야 하

므로 1530nm에서 1600nm 사이에서 0.8 nm 혹은 0.4 nm간격의 파장 선택 기술, 주어진 파장을 20년 이상 0.1 nm이내로 유지해야 하는 파장 locking기능, 이에 따른 power 안정화가 고려되어야 한다. 연속파 광원의 경우 insertion loss를 고려하고, EDFA없이 장거리 통신이 가능하도록 하려면 고풍력이 요구 되는데 현재는 30mW 모듈이 상용화되어 있다. 또한 backup용 혹은 optical cross connect용등 특별한 목적으로 tunable LD를 사용하기도 한다. 통신망을 감시 제어하는 용도로 10Mbps ~100Mbps대의 Er³⁺의 흡수대에 투명한 파장의 LD가 사용된다.

Long-haul과는 달리 medium-이나 short-haul의 통신시장은 특정한 network방식을 말할 수는 없지만, 사용될 LD에 대하여 논의할 수 있다. MAN경우는 2.5Gbps 대역폭의 광원을 사용하며 거리가 100 km내이므로 직접변조형 DFB-LD사용이 가능하다. short-haul은 광가입자용과 data 전송용 network으로 분리하여 말할 수 있다. 광가입자용은 1310nm 파장의 155Mbps 및 622Mbps FP (Febry Perot) -LD와 2.5Gbps, 10Gbps 대역폭의 DFB-LD가 있다. 여기서 단일모드 LD를 쓰느냐 다중모드 LD를 쓰느냐는 (거리)*(bit rate)~(상수)의 식에 의해 결정되며 상수는 사용되는 광 fiber의 종류와 파장에 의존한다. data 전송용 network에는 fiber channel, ATM, FDDI, ESCON, Ethernet, Gigabit Ethernet등이 있는데 전송거리에 따라 workgroup (80 m ~ 250 m), building backbone (250 m ~ 800 m), campus backbone(800m ~ 400m)으로 구분한다. 전통적인 data전송은 LED를 사용하였지만 workgroup

과 building backbone용에는 다중모드 광 fiber를 이용한 850 nm대의 VCSEL을 사용한다. Gigabit Ethernet이 data전송 시장을 석권할 것으로 예상되며 1.25Gbps 수준에서부터 단일모드 광 fiber를 사용하여 1310 nm 파장의 FP-LD가 사용되고 2.5Gbps 대역폭에서는 1310 nm 파장의 DFB-LD가 사용될 전망이다. 현재 이 시장이 선진국에서는 놀랄만한 속도로 팽창하고 있으며 HP에서 2.5Gbps/s×4 channel (10Gbps/s) WDM transmitter와 receiver를 개발하여 발표한바 있다^[1]. 이 외에도 CATV용 LD로 1310 nm와 1550 nm 파장의 DFB-LD를 사용한다.

위에서 살펴본 바와 같이 통신용 LD는 구조에 따라 VCSEL, FP-LD, DFB-LD로 나눌 수 있고 VCSEL과 초고속 LD중 VCSEL은 따로 다루므로 여기서는 FP-LD, spot size converter (SSC)를 집적화한 FP-LD, DFB-LD의 제조와 숨어 있는 물리적 의미를 다루고자 한다. 광통신용 LD는 광 모듈 형태의 package로 상품화되므로 LD chip 제작 뿐만 아니라 package도 상품 경쟁력 차원에서 매우 중요한 부분을 차지한다. 통신에 사용되는 광 fiber 종류에 따라 다중모드 광원으로 FP-LD를 사용하고 단일모드를 달성하기 위하여 grating이 들어간 DFB-LD를 사용한다. 또한 사용할 대역폭에 따라 LD의 제작과정이 많이 다르다. 대역폭이 (저항* 정전용량)에 의해 결정되기 때문이다. system에서 요구하는 기본 spec.은 ITU-T G.957에 명시되어 있다. 그러나 system에 적용시 요구하는 margin이 있고, 여러 회사들이 경쟁하고, 회사별로 요구하는 특성이 다르므로 상품으로 경쟁력을 확보하기 위하여 LD특성은 이보다 훨씬 우수해야 한다.

II. FP-LD

FP-LD는 상대적으로 낮은 대역폭과 짧은 거리의 통신에 사용된다. 따라서 초저가 모듈의 실현이 가장 중요하다. 초저가를 위하여 package는

uncooled type이고 lens를 사용하지 않으며 silicon optical bench (SiOB)의 V-groove위에 fiber를 passive 정렬하여 고정해야 한다. 이때 LD는 SiOB위에 flip chip bonding에 의해 정확한 위치를 잡아 고정한다. 이렇게 제작된 모듈은 광가입자의 경우 -40~+85°C, data 통신의 경우 0~+70°C 온도에서 ITU spec.를 system에서 요구하는 margin내에서 만족하고 20년 이상 신뢰성을 확보해야 하므로 LD의 신뢰성과 온도 특성이 매우 중요하다. LD의 온도특성은 사용한 재료와 LD 구조에 의존한다. 가장 쉽게 성장할 수 있는 구조는 InGaAsP/InGaAsP MQW(multiple quantum well) 구조이다. 그러나 이 구조의 conduction band off-set이 valence band off-set보다 작아 전자의 overflow가 상대적으로 심하여 characteristic temperature(T_0)가 50K 정도로 낮으므로 이를 개선하기 위하여 barrier의 파장, 양자우물의 폭과 갯수, SCH(separated confinement heterostructure)의 profile, 양자우물과 barrier에 strain인가동을 하여 약간의 개선을 할 수 있지만 60 K을 벗어나지 못하고 있다. 이를 획기적으로 개선하기 위하여 InGaAs/GaAs^[2], InGaAlAs/InGaAlAs^[3], InAsP/InGaAsP (or InAlGaAs)^[4] 구조의 성장을 연구해 왔으나 좋은 온도특성에도 불구하고 좋은 막질을 얻지 못하거나 Al이 들어간 구조의 경우 재성장 (regrowth)에 의한 BH(buried heterostructure)를 만들기 어려워 고출력에서 모드 안정화를 피하기 힘든 단점 또한 가지고 있다.

BH FP-LD제작 순서는 n-doped InP 기판위에 LD의 기본구조 성장, mesa etching을 위한 thin film(SiO₂ 혹은 SiNx) mask공정 및 photolithography, mesa etching, 1차 재성장, mesa etching용 mask의 제거와 2차 재성장, 100μm의 두께로 lapping과 polishing후 ohmic metal공정, scribing과 breaking에 의한 bar cleaving, facet coating, chip making, chip test, assembly, package순으로 진행된다. 각 제작 과정에서 엄격한 검사를 거치고 특히 assembly과정에서는 purge와 burn-in을 통해 chip을 걸러낸다. 이렇

게 제작된 모듈은 마지막으로 reliability assurance test (Bellcore TR-NWT-000468 이나 MIL-STD-883C참고)를 거쳐 고객에게 전달된다. 위의 공정 순서에 따라 중요한 부분만을 아래에서 언급하려 한다.

1. 기본 LD구조 성장

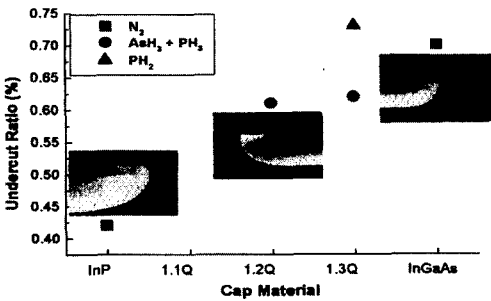
LD의 기본 구조는 LD의 동적 정적 특성에 영향을 미친다. 먼저 epi quality가 전제되고 다음으로 설계에 의해 결정되는 well의 strain (compressive strain인 경우 클 수록 모든 LD 특성이 개선되나 너무 커지면 critical thickness에 의해 epi quality가 제한되고, well폭이 좁아져 interface fluctuation에 의한 loss와 quantum efficiency가 나빠짐), band offset(characteristic temperature와 carrier transport), p-clad로부터 active층으로 Zn diffusion (carrier lifetime이 감소하여 threshold current가 증가하고 internal quantum efficiency가 줄어 slope efficiency가 줄), well 수(well 수가 증가하여 optical confinement가 커지고 modal gain이 증가하여 threshold current를 줄일 수 있고 온도 특성을 개선할 수 있으나 upper bound는 critical thickness에 의한 epi quality의 저하가 예상됨), setback layer (적당하면 p-clad로부터 Zn diffusion을 방지할 수 있고 너무 두꺼우면 hole injection과 p-n junction위치가 active층에서 벗어나 LD 특성의 저하를 가져올 수 있음)등의 변수들이 최적화 되어야 한다.

레이저 특성의 한계는 기본적으로 conduction band와 valence band사이의 비대칭 band 구조에 의한 것이다. 따라서 반도체 레이저의 특성을 개선하기 위하여 band 구조를 보다 대칭 구조로 재구성이 필요하며, 이를 위하여 활성 층에 strain을 인가해야 한다. 따라서, 여기에서 다루는 구조는 strained MQW(multiple quantum well)이며, strain을 위주로 반도체 레이저 특성을 기술한다. strain층은 임계 두께 이하로 성장되어야 하므로 양자 우물 수를 늘리기 위하여 얇은 양자 우물이나 부분적으로 보상된 양자 우물 구조를 사용한다.

(001)방향으로 성장한 zincblend구조에 biaxial strain을 인가하면 tetragonal deformation에 의해 생긴 deformation potential은 hydrostatic 성분과 shear 성분으로 분리되고, hydrostatic 성분은 단지 bandgap 에너지에만 영향을 주고 대부분의 물리량의 변화는 shear strain에 의해서 일어난다. biaxial strain이 인가된 MQW 레이저의 특성 개선을 여러 가지 측면에서 기대할 수 있다. tensile strain도 compressive strain과 같이 symmetric band구조를 만드는데 사용될 수 있다. 그러나 몇 가지 점에서 compressive strain과 다르다. 첫째, conduction band offset이 줄어들어 온도 특성을 나빠지게 할 수 있다. 둘째, TM 평광 특성 때문에 양자 우물에서 carrier들이 전기장의 E-field에 평행하게 움직일 수 없기 때문에 plasma 효과를 무시할 수 있다. $1.55\mu\text{m}$ InGaAs MQW LD구조에서 tensile strain이 0.9%로 증가 할 때까지 LH (light hole)-HH (heavy hole) mixing이 최대가 되고 heavy hole의 질량은 계속 증가하므로 LD 특성 향상을 기대할 수 없다. strain이 1% 이상 증가 했을 때 LH가 valence band maximum이 되어 TM특성을 보여준다. tensile strain을 더 증가시키고 MQW의 파장을 맞추기 위하여 well의 두께를 늘리면 LH-HH subband의 분리가 커져서 유효 질량과 non-radiative 손실이 줄어든다. 1.6% strain에서 이 값들은 최소가 되고, 더 strain을 증가하면 임계 전류 밀도가 갑자기 증가한다. 첫째는 파장을 맞추기 위하여 well의 두께가 너무 늘어나 총 well의 두께가 critical thickness를 초과하여 misfit dislocation이 형성되기 시작했고, 둘째 conduction band offset이 낮아졌고 2.1%가 되면 type II band 구조로 바뀐다. Compressive strain 경우는 strain에 따라 heavy hole의 유효 질량이 계속 줄고 1%정도에서 최소값을 갖고 1.5% 이상이 되면 다시 임계 전류 밀도가 늘어난다. 이는 well의 두께가 줄어 계면의 roughness때문에 전류 injection efficiency가 나빠지고 gain curve가 넓어지고 준다. 결국 well내의 전자 밀도를 늘리고 Auger recombination이 늘어난다. Band gap이 큰 InGaAsP를 사용하면 주어진 strain에 대하여

넓은 well이 가능하므로 보다 나은 특성을 기대 할 수 있다. 정적특성 뿐만 아니라 동적특성도 strain에 크게 의존한다. strain의 최적화는 그만큼 중요하다. FP-LD의 경우 well에 compressive strain을 1%인가하고 barrier에 tensile strain을 0.3%인가 했을 threshold current, slope efficiency, characteristic temperature등이 극대화되지만 제작한 chip의 신뢰도는 well과 barrier사이의 net strain에 따라 저감됨을 알 수 있다. 따라서 물질에 따라 차이가 있지만 신뢰도 측면에서 well의 strain이 compressive의 경우 0.8%를 넘지 않고 barrier의 경우는 matching조건을 사용하는 것이 바람직하다. Critical thickness 때문에 well 수를 늘릴 수 없는 경우 barrier에 반대 strain으로 compensation하여 well수를 늘릴 때는 소자 제작 후 신뢰성이 검증되어야 한다. 또한 well과 barrier사이의 strain차가 커질 수록 MQW의 thermal stability가 낮아 regrowth하는 동안 MQW의 transition에너지가 blue shift하게 된다.

성에 큰 영향을 준다. etching후 마지막에 DI water로 표면처리를 할 때 DI water의 자연증발을 막기위하여 N₂ blowing을 하거나 spin dry를 해야 하는데 이를 위하여 SiO₂의 adhesion이 좋아야 한다. 따라서 cap의 재료 선택은 mesa용 mask와 adhesion 관점에서 신중히 고려되어야 한다. 그림 1은 cap 물질에 따른 etching profile을 보여주고 있다. 여기서 Q=InGaAsP 이다. etchant로는 isotropic etchant로 잘 알려진 HBr: H₂O₂: H₂O를 사용하였다. undercut ratio는 bandgap 에너지가 작아짐에 따라 커짐을 알 수 있다. 결국 이는 접촉하는 phosphorus mole fraction에 비례하여 adhesion이 변하여 나타나는 결과이다. 또한 성장 후 cooling조건에 따라 undercut ratio가 다를 수 있다. 예를 들면 Phosphorus분위기에서 적당한 조건으로 cooling하여 adhesion은 늘리고 역 mesa profile은 억제할 수 있다.



(그림 1) Cap 재료에 따른 adhesion.

cap층의 재료는 InP에서 InGaAs까지 다양하다. cap의 재료에 따라 mesa etching용 mask와 adhesion이 다르다. 이 adhesion은 wet etching의 경우 undercut 비(=undercut 폭/깊이)를 결정하므로 mesa etching profile이 이에 의존하여 결국 current blocking 층을 성장시 blocking층의 기하학적 구조에 영향을 준다. p-n blocking은 비교적 이 profile에 둔감한 편이지만 i(semi-insulating)-n blocking의 경우는 상대적으로 민감하다. 또한 mesa etching후 mesa 계면의 처리에 따라 LD특

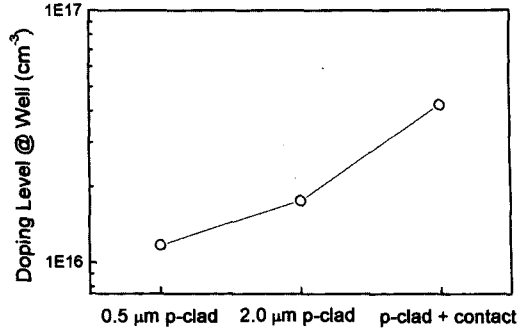
2. mask 형성공정과 mesa etching

이 공정의 궁극적 목적은 활성층폭 조절과 current blocking층은 잘 만드는 것이다, 500MHz 이하의 대역폭에 대하여 p-n blocking구조와 ohmic pad의 폭을 조절하여 가능하지만 이상의 대역폭을 얻기 위하여 double trench공정을 추가하거나 i-n blocking구조를 사용해야 한다. 대역폭이 소자의 capacitance성분에 의하여 제한되기 때문이다. current blocking특성과 이의 온도 특성 관점에서 p-n blocking 특성이 우수하므로 uncooled LD의 경우는 p-n blocking을 사용하는 것이 바람직하다. current blocking 특성은 mesa etching profile 즉 활성층이 있는 곳에서 폭, mesa depth, undercut에 의존한다. 이 profile을 얻기 위하여 먼저 mesa etching용 mask 폭을 정확히 맞추어야 한다. Mask 폭은 mask 막질, photolithography공정, etching등에 의존하므로 이들 공정을 최적화하여 wafer내에서 뿐만 아니라 run에 따른 폭의 uniformity를 5.0±0.2μm이내로 확보해야 한다. 물론 uniformity관점에서 보면 wet etching보다는 dry etching이 유리하다. long term reliability관점에서 상용화 공정에 도입

을 주저하고 있는 실정이다. uniformity관점에서 dry etching이 유리하나 재성장 후 평탄화와 신뢰성 관점에서 wet etching이 유리하다 볼 수 있다. mesa etching profile은 사용한 식각용액에 따라 다르다^[5]. 재성장에서 요구하는 etching profile에 따라 식각 용액과 식각방법을 선택한다. lateral방향으로 단일모드를 유지하기 위한 활성층의 임계 폭이 1 μ m정도이므로 active 폭은 항상 일정한 값으로 유지되어야 한다. 1 μ m이하일 때 mesa계면에서 광밀도가 증가하여 계면에 분포한 결함들이 영향을 주기 시작하므로 1 μ m보다 약간 넓게 하는 것이 바람직하다. 이 경우라도 마지막 세척을 DI water로 하므로 좋은 재성장 계면을 얻기 위해서는 DI water의 비저항이 15 megohm.cm이상이어야 하고 이 외에 불순물인 silicon, carbon량도 추가로 최소화 해야 한다.

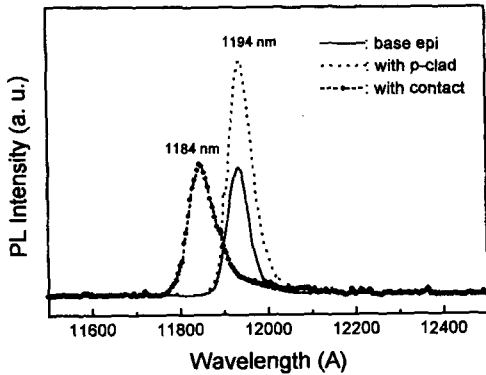
3. 재성장

1차 재성장온 전류차단층 구조의 성장이고 2차는 나머지 p-clad층과 ohmic 접촉층을 성장하기 위한 것이다. 1차 재성장 공정은 기본적으로 전류차단 역할과 모드 조절의 기능으로 볼 수 있다. p-n전류차단 특성은 기하학적 구조와 doping level에 의존한다. 중요한 변수는 n층에서 활성층 가장자리까지의 수평 거리와 n층의 doping level이다⁵. n층의 doping 밀도가 높고 수평거리가 가까울수록 blocking특성은 우수한 반면 굴절률이 낮은 n층이 활성층 가까이 접근함에 따라 cavity에 국소화된 모드 분포가 영향을 받아 찌그러지게 되고 결국 광 fiber와 coupling efficiency에 영향을 주므로 최적 조건을 잡을 때 주의해야 한다. 재성장의 번거로움과 수율에 영향 때문에 일부에서는 BH구조대신 RW(ridge waveguide)구조를 선호하는 경우도 있으나 고출력에서 모드 안정화 문제가 있으므로 유의해야 한다. 2차 재성장에서 중요한 부분은 series 저항을 7ohm이하로 줄이기 위하여 p-clad doping과 접촉층의 doping밀도를 적절한 수준으로 doping하는 것이다. MOCVD로 성장할 경우 hydrogen에 의한 passivation문제가 발생하여 원하는 성장을 끝낸 후 hydrogen-free 분위



(그림 2) Zn가 doping된 p-clad와 ohmic 접촉층을 성장함에 따른 MQW 활성층에서 doping농도

기에서 anneal 하거나 꺼낸 후 별도의 furnace를 이용하여 annealing하여 dopant를 활성화 시킨다. 활성화 온도는 400°C면 충분하다. doping 농도의 상한값은 dopant로 사용한 Zn의 활성층으로 diffusion에 의해 제한된다. Zn diffusion은 Zn doping 농도뿐만 아니라 clad층의 성장온도에 의존한다. 특히 접촉층의 doping농도는 1 × 10¹⁹ cm⁻³ 이상이므로 clad층의 5 × 10¹⁷ cm⁻³에 비해 훨씬 높아 접촉층을 성장하는 동안 Zn가 활성층까지 diffusion해 들어 갈 수 있다. 활성층에 Zn doping 농도가 증가하면 LD의 threshold current가 증가하고 slope efficiency가 감소할 뿐만 아니라 impurity induced disordering을 일으켜 gain peak이 blue shift하고 신뢰성에도 영향을 준다. 그림 2는 clad층만, 그리고 Zn doping한 clad층과 접촉층을 성장함에 따라 활성층에 Zn농도가 증가함을 보여주고 있다. doping농도는 SIMS측정에 의한 것이다. 그림 3은 각각의 구조에 대하여 PL (photoluminescenc)를 측정된 결과이다. 활성층에 Zn농도가 증가함에 따라 PL파장이 blue shift함을 보여준다. Zn가 1.5 μ m떨어져 있는 접촉층으로부터 p-clad층을 거쳐 활성층으로 diffusion하므로 vacancy 농도와 관련이 있으며 이는 결국 성장온도를 최적화하여 줄일 수 있을 것으로 기대된다. blue shift한 PL의 반축폭이 넓어져 MQW구조의 특성이 나빠졌음을 알 수 있다. 1차와 2차 재성장 사이에 mask을 잔류물이 남지 않도록 충분히 제



(그림 3) 나머지 p-clad층 성장까지는 blue shift하지 않고 마지막 접촉층 성장 때 blue shift가 일어나고 있다.

거해야 한다. 그러나 지나친 제거는 상대적으로 불안정한 mesa계면을 따라 HF계용액이 활성층까지 공격할 수 있으므로 주의 해야 한다. SiO₃ mask을 사용할 때는 HF계용액을 사용하여 제거하고 cap층도 selective etchant을 사용하여 제거해야 한다. 제거한 후 DI water로 rinse하고 N₂ gun을 사용 순간적으로 말려야 한다. 그렇지 않으면 불순물들이 mask접촉 부분에 남아 전자 주입을 방해할 수 있기 때문이다.

4. Ohmic metal 공정

Shottky 장벽의 높이는 bandgap 에너지에 비해 하고 장벽의 폭은 doping 농도에 반비례한다.

p-ohmic 접촉의 criteria은 접촉 비저항이 1×10^{-5} ohm.cm² 이하여야 한다. 이를 달성하기 위하여 InGaAs을 접촉층으로 사용하고 doping 농도가 2×10^{19} cm⁻³이상이 되어야 한다. 추가로 접촉층의 표면을 잘 처리하여 저항을 낮출 수 있다. p-ohmic metal로 AuZn, AuBe, TiPtAu, Pt-TiPtAu, PdTiPtAu등이 주로 사용되고 있다. AuZn나 AuBe은 0.3~0.4 μm spike junction을 형성하므로 접촉층의 두께를 0.5 μm 정도로 두껍게 해야 한다. 접촉층이 두꺼울 때 Zn diffusion문제를 염려해야 한다. 그러나 TiPtAu나 PtTiPtAu는 200 A정도의 얇은 junction을 형성하므로 500 A정도의 접촉층 두께로도 ohmic접촉을 할 수 있

는 장점이 있다.

5. Spot size converter integrated LD

광가입자용 모듈의 가격을 낮추기 위하여 direct fiber pigtailling, passive alignment여야 한다. 이를 가능하게 하기 위하여 기존의 FP-LD는 SSC (spot size converter)-LD로 대체되어야 한다. FP-LD를 fiber에 direct coupling 했을 때 1dB coupling efficiency와 alignment tolerance가 15%, 0.7 μm정도이다. 이러한 값으로는 direct coupling이 불가능 할뿐만 아니라 uncooled 모듈의 온도 특성도 확보하기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 passive taper (lateral 혹은 vertical 방향으로) 광도파로를 LD에 집적화하여 output facet에서 near field을 키워 즉 far field의 divergence angle을 줄여 coupling efficiency와 alignment tolerance를 50%, ±2.0 μm로 개선하여 passive alignment를 가능하게 하고 신뢰성을 확보하도록 해야 한다. taper구조의 광도파로를 이용하여 optical confinement를 줄이기 위하여 lateral taper나 vertical taper을 사용하는데 여러 가지 이유로 vertical taper구조를 보편적으로 사용하고 있다^[7]. Vertical taper구조를 실현하기 위하여 etch and regrowth에 의한 butt-joint법과 SAG (selective area growth)에 의한 방법이 있다. 이 두 경우 40%이상 coupling efficiency, ±2.0 μm 정도의 misalignment tolerance를 확보하기 위하여 LD의 활성층과 양쪽 SCH층의 두께를 facet면에서 두께에 비해 3배 이상으로 tapering을 주어 far field 각도를 15° × 15° 정도로 줄여 준다.

III. DFB-LD

FP형 반도체 레이저에서 optical feedback은 모든 횡모드에 대해서 그 크기가 거의 같은 facet 반사에 의하여 공급된다. 이 레이저에서 횡모드의 선별은 이득 분포에 의해서만 얻어진다. 그러나 이득 분포는 횡모드 사이의 간격보다 훨씬 넓기 때문에

기대하는 모드 선별(SMSR: Side Mode Suppression Ratio > 40 dB) 특성을 얻기 힘들다. 따라서, 빛이 cavity를 따라 이동하는 동안 각각의 횡 모드에 대하여 다른 cavity 손실을 인가하여 모드 선별 특성을 향상 시킬 필요가 있다. 이 방법 중 하나가, cavity를 따라 균일하게 feedback을 공급하는 구조의 DFB-LD이다. DFB LD는 cavity를 따라 굴절률의 주기적 변화 (grating)에 의하여, 진행하는 파와 후진하는 파를 결합하여 발생한 Bragg 조건에 의하여 모드 선별을 준다. 따라서 모드 선별은 grating의 주기와 매질의 굴절률 차이에 의하여 결정된다.

DFB LD는 첫째, FP-LD에 비하여 모드 선택과 chirping 특성이 우수해야 한다. 둘째, 충분한 변조 대역폭을 가져야 한다. 셋째, 장거리 수신을 위하여 필요한 고출력을 내야 한다. 20년 이상 안정한 동작과 낮은 BER(Bit Error Rate)로 동작하기 위하여 우수한 온도 특성을 가져야 한다. 2.5Gbps 혹은 이 이상(10Gbps, 40Gbps 등)의 고속 변조 대역폭으로 장거리 전송이 가능하기 위하여 가장 중요한 변수는 chirping이다. coherent transmission에서 전송 거리는 chromatic dispersion에 의해 제한된다. 따라서 high bit rate 전송에서 spectral width는 매우 중요하다. spectral linewidth와 wavelength chirp을 결정하는 중요 변수는 linewidth enhancement factor이다. Linewidth enhancement factor는 carrier density에 따른 optical gain와 굴절률의 변화 비로 정의 된다. chirping양은 bias 전류 값이 높을수록, 변조 전류량이 적을수록, 변조 bit rate가 적을수록 작게 얻어짐을 알 수 있다. 동일 광 출력과 bit rate조건 하에서 작은 chirping양을 위하여 활성 층에 미분 이득이 큰 구조의 채택(modulation doping, strain, well 수의 증가 등), 발진 파장을 gain peak 파장보다 단파장에 설정, spatial hole burning에 의한 adiabatic chirp을 줄이기 위하여 Bragg reflector의 광결합 계수 k 와 공진기 길이 L 의 곱 kL 값을 1.5~2로 조절하는 방법들이 있다. 그런데, negative detuning의 경우 발진 파장이 심하게 이득 파장에서 detuning

되면 transparency current가 증가하므로 15 nm 정도가 적당하다. kL 값을 늘리면 I_{th} 는 줄어들지만, 너무 늘어나면 spatial hole burning에 의해 L -I에 kink가 생겨 single mode probability가 낮아지고, adiabatic chirp이 발생한다. 일반적으로 InGaAsP bulk활성층인 경우 k 는 5~10정도, lattice-matched MQW인 경우 3~5, strained MQW의 경우 2~4, modulated strained MQW의 경우 1~3정도 이다.

반도체 레이저의 변조 대역은 resonance frequency(current or power limited), damping (spectral hole burning or carrier heating limited), transport(diffusion or tunneling limited), parasitic(capacitance or resistance limited)에 의하여 제한된다. 반도체 설계에 있어 가장 중요한 변수는 미분 이득을 크게 하는 것이다. 이는 변조 대역과 임계 전류를 줄일 뿐만 아니라 고속 직접 변조 레이저에서 가장 중요한 chirp를 줄이는 방법이기도 하다. 미분 이득을 늘리기 위하여 활성 층에 양자 속박 효과 도입, p-type modulation doping사용, tensile혹은 compressive strain 인가, 발진 파장과 이득 피크 파장의 detuning주는 방법이 있다. 양자 속박 효과와 strain인가는 기본적으로 valence band의 mixing 효과를 줄인다. 활성층을 acceptor로 도핑하면 quasi Fermi level의 separation을 인위적으로 주므로 문지방에 도달하는 injection carrier의 수를 줄여 미분 이득의 증대 효과를 얻을 수 있다. 그러나 활성 층에 직접 p-doping을 하면 internal loss가 증가하고 band tailing효과가 있으므로 barrier에 doping하여 활성 층에 hole을 공급하는 modulation-doping을 사용하는 것이 바람직하다.

DFB 레이저에서 grating의 주기를 바꾸면 lasing 파장은 활성 층의 이득 피크 파장에 독립적으로 조절이 가능하다. lasing이 일어나는 파장에서 이득이 충분한 경우에는 lasing파장을 이득 파장과 일치시킬 필요가 없다. 미분 이득은 lasing 파장이 이득 peak보다 짧은 파장쪽에 있을 때 높다. 따라서, 미분 이득을 증가시키기 위하여 이득이 충분한 범위 내에서 lasing 파장을 이득 peak

에 대해 negative detuning을 주는 것이 바람직하다. 기생 용량에 의한 변조 대역의 제한은 $f_{3dB} = 1/(2\pi RC)$ 로 표현된다. 기생 용량 C를 줄이는 방법으로는 반 절연체를 이용한 BH의 사용, double trench와 함께 p-n BH 구조의 사용, polyimide와 같은 두꺼운 유전체 전류 차단 층 도입, 그리고 bonding pad면적의 축소가 있다. 낮은 직렬 저항 또한 변조 대역의 제한을 줄이고 heating 영향을 최소화하기 위하여 필요하다. 총직렬 저항은 ohmic 접촉저항, p-clad층의 doping 농도, heterojunction interface에 의존한다. 좋은 contact 금속과 높은 doping농도를 이용하여 Schottky barrier의 높이를 낮추고 두께를 좁혀 낮은 접촉저항을 얻는다. p-clad층의 doping 농도를 늘려 bulk저항을 줄일 수 있다. 그러나 doping 농도가 너무 높은 경우 활성층과 proximity 접촉을 하고 있으므로 레이저의 internal loss를 증가시킬 수 있다.

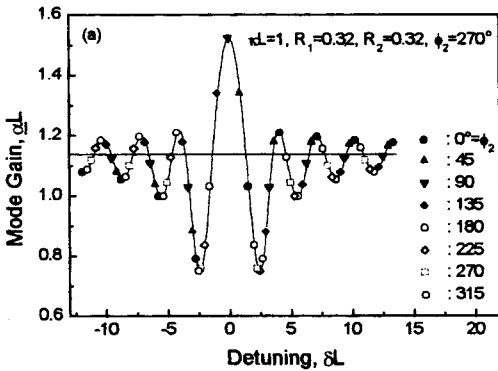
정공이 top SCH층을 통과하는 transport time과 활성층에서 bottom SCH층으로 emission time의 효과가 변조 대역 특성에 고려되어야 한다. SCH층은 일반적으로 internal loss를 줄이기 위하여 doping하지 않는다. 이는 정공이 SCH층을 통과하는 동안 delay가 생겨 변조 반응 곡선에 parasitic 효과처럼 low frequency roll-off을 만든다. 이 SCH층의 bandgap 에너지는 활성층에 있는 carrier의 confinement energy를 결정한다. carrier의 escape time은 이 에너지의 지수 함수이다. 낮은 barrier는 bandfilling효과와 carrier emission에 의하여 미분 이득을 낮춘다. transport 효과는 MQW구조에서 훨씬 복잡하다. 좁은 SCH에 대하여 optical confinement factor의 감소 때문에 임계 이득이 증가하고 미분 이득이 낮아져 변조 대역폭은 낮아진다. SCH층이 두꺼워지면 carrier transport time이 증가하여 변조 대역폭은 낮아진다. 따라서 SCH의 최적 두께는 optical confinement factor가 최대인 값과 대략 일치한다. SCH의 다른 효과는 두께에 따른 linewidth enhancement factor의 변화이다. SCH층의 두께가 넓어지면 이 두께의 제공에 비례하여 carrier

transport time이 증가하고 optical confinement factor가 줄어서 chirp이 증가한다. 변조 대역폭을 늘리기 위하여 사용될 마지막 변수는 레이저 공진기 내에서 광자 밀도이다. 레이저의 변조 대역폭을 늘리기 위하여 optical confinement를 늘려야 하며, 긴 공진기는 이를 위하여 바람직하지 않다. $\lambda/4$ shifted grating에서처럼 공진기 내에 광자 밀도가 균일하지 않고 위상이 변하는 공진기 가운데서 특히 높기 때문에 carrier밀도는 상대적으로 낮아 굴절률이 공진기를 따라 일정하지 않으므로 다중 모드를 형성할 가능성이 높아진다. 이런 spatial hole burning 효과는 위상 변화에 비례하고 grating과의 결합 상수 k에 비례한다. 따라서 spatial hole burning효과는 공진기에서 최대 광자 밀도를 제한하고 결국 공진 주파수를 제한한다.

FP 레이저의 threshold 조건은 외부 feedback 조건으로 facet 반사율 만이 있지만 DFB LD에서는 grating과의 coupling, facet 반사율, grating의 facet phase가 레이저의 mode를 결정한다. 따라서 mode의 threshold 조건을 구할 때 confined mode의 evanescent field와 grating과의 coupling, facet phase에 의존하는 반사율이 고려되어야 한다. 양쪽 facet에 대칭 반사율을 가정하면 Bragg mode 주의에 가까운 두 mode가 doubly degenerate된다. single mode을 갖기 위하여 이 degeneracy을 제거해야 한다. 이를 위해 두 가지 방법이 있다. facet phase를 비대칭으로 만들거나 AR/HR coating에 의하여 비대칭 경계 조건을 주어 degeneracy을 제거하여 mode 사이에 side mode suppression ratio (SMSR)를 40dB 이상으로 만들어야 한다. facet phase는 cleaving에 의하여 결정되고 grating 주기가 2400Å이므로 인위적으로 조절할 수 없다. 따라서 facet phase는 확률에 의존할 수 밖에 없다. 인위적으로 조절할 수 있는 유일한 방법은 AR/HR coating이다. degeneracy를 가능한 제거하기 위하여 facet coating차를 많이 주면 carrier의 지나친 non-uniform 분포에 의하여 longitudinal spatial hole burning이 일어나 L-I curve에 kink가 일어난다. 위에서 언급 한 것 처럼 single mode

probability을 조절할 수 있는 변수는 kL 과 AR/HR coating이다. 따라서 이 변수들을 최적화하기 위하여 threshold current 근처에서는 single mode 확률을 높이고 threshold current 이상에서는 longitudinal spatial hole burning 효과를 최소화 하는 쪽으로 설계하여야 한다.

그림 4 에서 수평선은 FP LD의 threshold gain



(그림 4) $\mu L=1$ 인 경우에 각각의 facet phase 조건에 따라 변하는 threshold gain 조건을 나타낸다.

이다. DFB LD의 threshold gain이 FP LD의 것보다 항상 낮음을 알 수 있다. 그림에 나타나지는 아니했지만 DFB LD의 threshold gain은 coupling 계수가 증가함에 따라 감소한다. DFB와 FP중 어느것이 먼저 lasing하느냐는 material의 gain profile에 의존한다. 만일 gain peak이 Bragg 파장 근처에 있으면 DFB mode가 lasing하고 gain peak이 Bragg 파장에서 너무 많이 떨어져 있으면 gain peak에 가까운 FP mode가 먼저 threshold에 도달할 것이다. DFB-LD의 design에는 single mode probability뿐만 아니라 chirping이 더 중요한 문제이다. chirping이 Bragg 파장과 gain peak사이의 detuning에 의존하므로 이 값이 먼저 설정되어야 한다. Bragg peak이 gain peak의 짧은 파장 쪽에 있을 때 chirping이 작아지므로 Bragg 파장에서 gain을 고려하여 우리의 design에서는 15 nm의 negative detuning을 주었다. Bragg 파장을 중심으로 하고

양쪽에 +1차와 -1차 DFB mode사이에 stop band가 존재한다. 이는 반도체의 경우 Bloch electron이나 hole이 energy band gap을 갖는 이유와 같다. $-\pi/2 < \phi_2 < \pi/2$ 에서는 negative detuning 쪽이 threshold gain이 낮은 반면 $\pi/2 < \phi_2 < 3\pi/2$ 에서는 positive detuning 쪽 mode의 threshold gain이 낮게 나타남을 알 수 있다

소자의 제작 방법은 grating 공정과 facet coating을 제외하고 FP-LD와 유사하다. 다만 변조 대역 폭을 늘리기 위하여 p-n 전류차단층 대신에 i-n 전류차단층을 채택한 점이 다르다. 여기서는 FP-LD 제작에 추가되는 공정만을 소개하고자 한다.

1. grating의 제작과 thermal deformation

kL 을 결정하는 grating의 모양은 holographic 방법에 의한 grating의 형성과 MOCVD내에서 성장 온도로 heat-up하는 도양 발생하는 thermal deformation에 의해 결정된다. thermal deformation을 결정하는 변수는 AsH_3 , PH_3 , heat-up time과 최종 온도이다. grating의 기하학적 구조의 변화는 mass transport 현상에 의해 설명된다. grating의 종류에는 보편적으로 사용해온 균일한 corrugation grating외에 double degeneracy된 모드를 깨기 위하여 grating의 중간에 $\lambda/4$ 위상차를 주는 $\lambda/4$ -shift grating, 이 경우 phase shifting이 일어나는 center에서 빛의 밀도가 커져 hole burning이 일어나 kink를 발생하므로 이를 개선하기 위한 corrugation-pitch-modulated grating과 bent waveguide grating이 있고 주기적인 gain이나 loss 구조를 이용한 complex-coupled grating이 있다. 균일한 corrugation grating의 경우도 run-by-run uniformity을 향상하기 위하여 InP대신 InGaAsP를 사용하여 grating을 제작할 때 heat-up동안 mass transport가 적게 일어나므로 보다 controllable하게 된다. Heat-up 하는 동안 mass transport는 AsH_3 의 부분압에 의해 조절한다. grating의 주기는 발진 파장을 결정하므로 1.5 A 정확도로 조절 가능해야 한다. 가장 중요한 변수는

grating의 높이이다. (111)A 면으로 etching하면 thermal deformation후 grating이 150 Å 높이가 되어 kL 값이 1이하가 된다. etching전 wafer의 반사율이 40~45%가 되어야 하고, grating etching공정을 안정화하여 (112)면으로 critical etching한 후 약간 over etching하여 회절 효율이 10~12%에 들어오도록 한다. grating의 최종 높이는 coupling coefficient을 결정하므로 조절 가능해야 한다. 이 높이는 grating의 초기 높이와 MOCVD chamber내에서 thermal deformation조건에 의존한다.

2. 재성장

첫째 semi-insulating 층의 resistivity가 1×10^{18} ohm.cm 이상 이어야 하고 이를 위하여 Fe의 chemical concentration이 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이상이고 activity가 0.5 이상이어야 한다. 이 값을 유지하기 위하여 성장 온도, ferrocene flow, PH_3 flow가 control되어야 한다. 둘째 semi-insulating 층의 두께를 mesa etching depth보다 $0.1 \mu\text{m}$ 만큼 두껍게 성장하여 $0.8 \mu\text{m}$ n-InP층을 성장하여도 mesa 양쪽에 $0.3 \mu\text{m}$ 정도의 opening이 형성되도록 하는 것이 바람직하다. 셋째 semi-insulating층 위에 $0.8 \mu\text{m}$ 의 Si-doped층을 성장하여 semi-insulating층에 Zn diffusion을 방지하고 동작 동안 double injection이 일어나지 못하게 한다. 2차 재성장하는 나머지 p-clad층과 contact층의 성장으로 구성되며, Zn diffusion에 의해 active에 영향을 미치고 1차 성장 층에도 Zn와 Fe의 interdiffusion을 통하여 영향을 미친다. active 층에 Zn diffusion은 최소화하고 활성층 근방에 p-i-n구조에서 double injection^[8]을 피하여 우수한 L-I-V 특성을 확보하여야 한다. 이를 위하여 clad층의 Zn concentration이 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이상 이어야 하고 두께는 $2.0 \mu\text{m}$ 이어야 한다. Pt-Ti-Pt-Au와 3×10^{-6} ohm.cm 이하의 접촉 얻기 위해 contact층의 Zn concentration은 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 을 유지해야 한다. Zn가 수소로 passivation되므로 wafer를 reactor에서 꺼내기 전 annealing하여 activation 시켜야 한다.

3. facet coating

위에서 언급했듯이 single mode probability는 공정에서 조절할 수 없는 facet phase에 의존하므로 facet phase에 둔감하게 하고 degeneracy를 제거하여 single mode probability를 높여야 한다. 이를 위하여 output facet쪽에 AR(anti-reflection) coating을 치고 반대면에 HR(high reflection)을 친다. 물론 지나치게 비대칭 구조로 coating하면 longitudinal spatial hole burning에 의한 L-I curve에 kink를 유발하므로 주의해야 한다. 이러한 일련의 최적화 과정은 kL 에 따라 다르므로 single 모드 확률을 극대화 하기 위하여 AR, HR, kL 이 함께 고려되어야 한다.

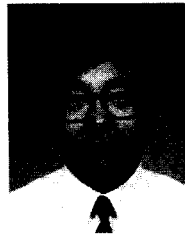
※ 이 원고를 쓸 수 있도록 도와준 헌신적인 21명의 광통신 소자팀원들과 항상 인내로 이끌어준 김태일 이사님께 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Brian Lemoff, Low-cost WDM: The future of the fiberoptic LAN, '98 OFC workshop.
- [2] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani, M. C. Larson, and Uomi, 1.3 mm continuous wave lasing operation in GaInNAs quantum well lasers, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 4, 487, April, 1998.
- [3] C. Zah, R. bhat, B. Pathak, F. Favire, W. Lin, M. C. Wang, N. C. Andreadakis, D. M. Hwang, T. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders, and J. Hsieh, High-performance uncooled 1.3 mm AlGaInAs/InP strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 30, no. 2, 511, Feb., 1994.

- [4] P. Thiagarajan, A. Bernussi, H. Temkin, and G. Robinson, Growth of 1.3 mm InAsP/InGaAsP laser structure by gas source molecular beam epitaxy, vol. 67, no. 25, 3676, Dec., 1995.
- [5] J. Zilko, B. Segner, U. Chakrabarti, R. Logan, J. Lopata, D. Van Haren, J. Long, and V. McCearry, Effect of mesa shape on the planarity of InP regrowths performed by atmospheric pressure and low pressure selective metalorganic vapor phase epitaxy, vol. 109, 264, 1991.
- [6] N. Dutta, D. Wilt, and R. Nelson, analysis of leakage currents in 1.3 mm InGaAsP real index guided lasers, vol. 2, no. 3, 201, Jun, 1984.
- [7] Y. Itaya, Y. Tohmori, M. Wada, and H. Fukano, spot-size converter integrated laser diodes, '97 2nd OECC, 10C1-1, 436.
- [8] M. Lampert, double injection in insulator, Phys. Rev., vol. 125, no. 1, 126, Jan., 1962.

저 자 소 개



秋 案 求

1959년 2월 8일생, 1981년 2월 전남대학교 물리 학사, 1984년 2월 서울대학교 물리 석사, 1992년 7월 Univ. of Cincinnati, 물리 박사, 1992년 8월~1994년 9월 Post-Doctoral fellow, 1994년 9월 ~현재 삼성종합기술원 광전자 Lab, (주관심 분야: 광통신용 모듈 및 subsystem 모듈제작과 반도체 물성분석)
